

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Katedra elektroniky**

# **Zdrojové struktury pohonných jednotek hybridních vozidel**

THE SOURCE STRUCTURE OF HYBRID VEHICLE PROPULSION UNITS - DISSERTATION

Disertační práce

Ing. Petr Vaculík

Školitel: prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.

Ostrava, duben 2011

*Touto cestou bych rád poděkoval především prof. Ing. Petru Chlebišovi, CSc. za ochotné a důsledné vedení mé práce, za jeho pomoc, cenné připomínky a rady, za neustálou otevřenost k diskusi a zejména za všechny čas, který mi v konzultacích věnoval.*

*Mé poděkování patří také všem členům Katedry elektroniky za rady, připomínky a pomoc při realizaci mé disertační práce.*

*Na závěr bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni Petře Martinkové za jejich trpělivost a podporu po celou dobu mého studia.*

Prohlašuji:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji závěrečnou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití školního díla a § 60 – školní dílo;
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo závěrečnou práci nevýdělečně užít ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst.3);
- souhlasím s tím, že jeden výtisk závěrečné práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího závěrečné práce. Souhlasím s tím, že údaje o závěrečné práci, obsažené v abstraktu, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – závěrečnou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- závěrečnou práci anebo dílem se myslí bakalářská práce v případě bakalářského studia, diplomová práce v případě magisterského studia a disertační práce v případě doktorského studia.

**Prohlašuji, že jsem celou disertační práci včetně příloh vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.**

V Ostravě .....

.....

Ing. Petr Vaculík

## Abstrakt

Disertační práce se zaměřuje na popis současného stavu komerčně řešených pohonných systémů, napájecích zdrojů a prostředků akumulace energie elektromobilů a hybridních vozidel. Dokumentuje simulační modely vybraných zdrojů a pohonných jednotek vytvořených v programu Matlab® Simulink®. Zvláštní pozornost je věnována popisu vozidla CityEL, použitých komponentů a etap jeho modernizace. Těžiště této práce spočívá ve vytvoření simulací chování vozidla při jízdním manévru dle skutečného jízdního profilu a profilu zatěžování na válcové zkušební výkonu. V práci je provedena komparace simulačních výsledků s výsledky experimentálními.

## Abstract

The dissertation thesis focuses on the current state description of commercial drive units, power supplies and means of energy accumulation for electric and hybrid vehicles. The thesis provides simulation models of selected power supplies and drive units created by Matlab® Simulink®. Special attention is paid to CityEL description, with regard to the components used and the phases of its modernization. The focus of the thesis is to create a simulation of the vehicle's handling characteristics based on a real drive profile and the loading profile at the roller dynamometer. The thesis provides a comparison of simulation results and experimental results.

## Klíčová slova

elektromobil, hybridní automobil, pohonná jednotka, CityEL, akumulátor, LiFePO<sub>4</sub>, balanční jednotky, palivový článek, ultrakapacitor, výkonový měnič, jízdní odpor, SMPM, simulace, Matlab, Simulink

## Keywords

Electromobile, Hybrid-car, Drive Unit, CityEL, Accumulator, LiFePO<sub>4</sub>, Balanced Unit, Fuel Cell, Ultracapacitor, Power Converter, Drive resistance, SMPM, Simulation, Matlab, Simulink

# Obsah

Seznam symbolů .....	9
Seznam zkratk .....	11
Cíle disertační práce .....	12
Úvod .....	12
1 Zdroje elektrické energie hybridních soustav .....	15
1.1 Zdroje pro dlouhodobou dodávku energie .....	15
1.1.1 Spalovací motor .....	15
1.1.2 Akumulátory.....	16
1.1.2.1 Druhy chemických akumulátorů .....	16
1.1.3 Palivový článek .....	18
1.1.3.1 Využití palivových článků v praxi.....	19
1.1.4 Fotovoltaická energie .....	19
1.1.4.1 Využití solárních článků v automobilovém průmyslu .....	20
1.2 Komponenty pro krátkodobou akumulaci energie .....	21
1.2.1 Ultrakapacitorový článek .....	21
1.2.1.1 Využití ultrakapacitorových článků .....	22
1.2.2 Setrvačnickový akumulátor.....	22
2 Fyzikální rozbor .....	24
2.1 Hnací síla .....	24
2.1.1 Aerodynamický odpor.....	25
2.1.2 Odpor stoupání .....	26
2.1.3 Odpor valivého tření .....	27
2.1.4 Odpor zrychlení .....	28
2.1.5 Celkový jízdní odpor, potřebná hnací síla .....	29
2.2 Modelování dynamických vlastností vozidla v prostředí MATLAB® SIMULINK® .....	32
2.2.1 Model kinematického a dynamického chování pohonné soustavy vozidla.....	33
2.2.1.1 Zadávání parametrů modelu.....	34
2.2.1.2 Vnitřní struktura modelu.....	35
2.2.1.3 Blok výpočtu odporových sil a požadovaného momentu .....	36
2.2.1.4 Omezení momentu dle motoru .....	37
2.2.1.5 Blok dynamiky vozidla .....	37
2.2.1.6 Volba zobrazovaných charakteristik .....	38
2.2.2 Mechatronický model pohonné soustavy vozidla.....	38
2.2.2.1 Blok bateriového managementu systému – BMS.....	38
2.2.2.2 Blok pohonu s vektorově řízeným střídačem s SMPM.....	39
2.2.3 Spolupráce dvou napájecích zdrojů .....	40
2.2.3.1 Energetický management nulté úrovně.....	40
2.2.3.2 Energetický management vyšší úrovně .....	42
2.3 Modelování vlastností zdrojů v prostředí MATLAB® SIMULINK® .....	43

2.3.1	Model akumulátorové baterie .....	43
2.3.1.1	Model akumulátoru – vybíjení .....	44
2.3.1.2	Model akumulátoru – nabíjení.....	44
2.3.1.3	Předpoklady a limity modelu .....	45
2.3.1.4	Popis modelu Battery z Matlab® Simulink® SimPowerSystems .....	46
2.3.1.5	Konfigurace parametrů bloku Akumulator .....	47
2.3.2	Ultrakapacitorová baterie .....	49
2.3.2.1	Popis modelu Ultrakapacitor z Matlab-Simulink SimPowerSystems .....	49
2.3.2.2	Konfigurace parametrů bloku Ultrakapacitor .....	51
3	Popis platformy CityEL .....	53
3.1.1.1	Řešení problematiky elektromobilů na Katedře elektroniky .....	53
3.2	Experimentální vozidlo CityEL .....	53
3.2.1.1	Základní parametry elektromobilu CityEL.....	54
3.3	Vývojové etapy vozidla CityEL.....	55
3.3.1	Pohonná jednotka elektromobilu se stejnosměrným měničem a DC motorem napájeným z olověných akumulátorů .....	55
3.3.1.1	Polovodičový měnič .....	57
3.3.1.2	Stejnoseměrný motor s permanentními magnety.....	57
3.3.2	Pohonná jednotka elektromobilu se stejnosměrným měničem a DC motorem napájeným z ultrakapacitorové baterie .....	58
3.3.2.1	Polovodičový měnič .....	58
3.3.3	Pohonná jednotka elektromobilu se střídavým měničem a synchronním motorem s permanentními magnety napájeným z LiFePO <sub>4</sub> akumulátorů.....	59
3.3.3.1	Akumulátory LiFePO <sub>4</sub> .....	60
3.3.3.2	Balanční jednotka pro LiFePO <sub>4</sub> akumulátory.....	61
3.3.3.3	Polovodičový měnič .....	63
3.3.3.4	Řídicí metoda synchronního motoru s permanentními magnety.....	64
3.3.3.5	Synchronní motor s permanentními magnety - SMPM .....	64
4	Výsledky simulační .....	67
4.1.1	Vstupní parametry a vlastnosti vozidla CityEL .....	67
4.2	Simulace jízdy podle skutečného jízdního profilu v blízkosti VŠB-TU Ostrava.....	68
4.2.1	Profil VŠB, žádaná rychlost 40km.h <sup>-1</sup> , maximální zrychlení 1 m.s <sup>-2</sup> .....	69
4.2.2	Profil VŠB, žádaná rychlost 35km.h <sup>-1</sup> , maximální zrychlení 0,5 m.s <sup>-2</sup> .....	71
4.2.3	Profil VŠB, žádaná rychlost 20km.h <sup>-1</sup> , maximální zrychlení 0,3m.s <sup>-2</sup> .....	73
4.2.4	Profil VŠB – shrnutí výsledků.....	75
4.3	Simulace vlastností vozidla CityEL na válcové zkušební výkonu .....	77
4.3.1	Síla válcové brzdy 0N, maximální zrychlení 1,1m.s <sup>-2</sup> .....	78
4.3.2	Síla válcové brzdy 100N, maximální zrychlení 1,1m.s <sup>-2</sup> .....	79
4.3.3	Síla válcové brzdy 200N, maximální zrychlení 1,1m.s <sup>-2</sup> .....	80
4.4	Simulace mechatronického modelu pohonné jednotky .....	81
4.5	Simulace vícezdrojového systému s energetickým managementem nulté úrovně .....	84

5	Experimentální výsledky s elektromobilem CityEL .....	86
5.1	Testování pohonné jednotky elektromobilu se stejnosměrným měničem a DC motorem napájeným z olověných akumulátorů .....	86
5.2	Testování pohonné jednotky elektromobilu se stejnosměrným měničem a DC motorem napájeným z ultrakapacitorové baterie.....	87
5.2.1	Experimentální úloha č. 1.....	87
5.2.2	Experimentální úloha č. 2.....	88
5.3	Testování pohonné jednotky elektromobilu se střídavým měničem a synchronním motorem s permanentními magnety napájeným z LiFePO <sub>4</sub> akumulátorů .....	89
5.3.1	Síla válců brzdy 0N .....	90
5.3.1.1	Shrnutí naměřených výsledků pro žádanou sílu válcové brzdy $F_b = 0N$ .....	91
5.3.2	Síla válců brzdy 100N .....	92
5.3.2.1	Shrnutí naměřených výsledků pro žádanou sílu válcové brzdy $F_b = 100N$ .....	93
5.3.3	Síla válců brzdy 200N .....	94
5.3.3.1	Shrnutí naměřených výsledků pro žádanou sílu válcové brzdy $F_b = 200N$ .....	94
	Závěr.....	95
	Publikace autora .....	96
	Řešené grantové projekty .....	98
	Literatura.....	99
	Seznam obrázků a grafů.....	102
	Seznam tabulek.....	104
6	Přílohy .....	105

## Seznam symbolů

VELIČINA	ROZMĚR	POPIS
$\Delta h$	m	výšková diference vozovky
$\Delta l$	m	délková diference vozovky
$a$	$\text{m.s}^{-2}$	podélné zrychlení
$A$	V	amplituda exponenciální zóny akumulátoru
$A_x$	$\text{m}^2$	čelní plocha vozidla
$B$	$\text{A}^{-1}\text{h}^{-1}$	inverzní časová konstanta exponenciální zóny akumulátoru
$C$	F	kapacita kondenzátoru
$C_{UC}$	F	kapacita ultrakapacitoru
$C_{UCr}$	F	kapacita ultrakapacitoru s respektováním účinnosti výkonových měničů a bezpečnostní energetické rezervy
$c_x$	-	aerodynamický koeficient
$ESL$	H	ekvivalentní sériová indukčnost přívodů kondenzátoru
$ESR$	$\Omega$	ekvivalentní sériový odpor kondenzátoru
$F_h$	N	hnací síla
$F_{oa}$	N	aerodynamický odpor
$F_{os}$	N	odpor stoupání
$F_{ovt}$	N	odpor valivého tření
$F_{oz}$	N	odpor zrychlení
$F_{zpos}$	N	složka odporu zrychlení posuvných částí
$F_{zrot}$	N	složka odporu zrychlení rotačních částí
$G$	N	tíha
$g$	$\text{m.s}^{-2}$	gravitační zrychlení
$i^*$	A	filtrovaný proud akumulátorem
$i_c$	-	celkový převod mezi motorem a hnacími koly
$I_{DC}$	A	proud tekoucí meziobvodem
$i_p$	-	převod převodovky
$i_r$	-	převod rozvodovky
$J_k$	$\text{kg.m}^2$	moment setrvačnosti kola
$J_m$	$\text{kg.m}^2$	moment setrvačnosti motoru
$J_p$	$\text{kg.m}^2$	moment setrvačnosti převodovky
$K$	$\text{VA}^{-1}\text{h}^{-1}$	polarizační konstanta
$m$	kg	hmotnost (vozidla)
$M^*$	Nm	žádaná hodnota momentu
$M_B$	Nm	brzdný moment
$M_{re}$	Nm	moment potřebný ke zrychlení kol automobilu
$M_{rm}$	Nm	moment potřebný na zrychlení rotujících částí motoru



$M_{rot}$	Nm	rotační moment
$M_{rp}$	Nm	moment potřebný ke zrychlení částí převodového ústrojí
$n$	$\text{min}^{-1}$	otáčky motoru
$O_{zpos}$	N	odpor zrychlení posuvných částí
$O_{zrot}$	N	odpor zrychlení rotačních částí
$P_{fp}$	$W_p$	špičková hodnota výkonu fotovoltaického panelu. Udává se v jednotkách $W_p$ - watt peak – špičková hodnota
$P_k$	W	výkon na kole
$P_{oa}$	W	ztrátový výkon daný aerodynamickým odporem
$P_{os}$	W	ztrátový výkon daný odporem stoupání
$P_{ovt}$	W	ztrátový výkon daný odporem valivého tření
$P_{oz}$	W	ztrátový výkon daný odporem zrychlení
$Q$	Ah	kapacita baterie
$r_d$	m	dynamický poloměr – skutečný poloměr kola
$R_{IZ}$	$\Omega$	izolační odpor dielektrika kondenzátoru
$r_k$	m	valivý poloměr kola
$r_i$	$\Omega$	vnitřní odpor zdroje
$s$	-	sklon vozovky (stoupání)
$SOC_{bat}$	%	stav nabití baterie
$U_0$	V	konstantní napětí baterie
$U_{cap}$	V	napětí ultrakapacitoru
$v$	$\text{m.s}^{-1}$	dopředná rychlost vozidla
$v_0$	$\text{m.s}^{-1}$	rychlost protivětru
$W_{UC}$	J	Energie ultrakapacitoru
$W_{UCr}$	J	Energie ultrakapacitoru s respektováním účinnosti výkonových měničů a bezpečnostní energetické rezervy
$Z_k$	kg	zatížení kol
$\alpha$	$^\circ, \text{rad}$	úhel stoupání vozovky
$\lambda$	-	součinitel vlivu rotačních součástí
$\xi$	-	koeficient valivého tření
$\eta$	-	mechanická účinnost
$\rho$	$\text{kg.m}^{-3}$	hustota vzduchu
$\varepsilon_k$	$\text{rad.s}^{-2}$	úhlové zrychlení kola
$\varepsilon_M$	$\text{rad.s}^{-2}$	úhlové zrychlení motoru
$\omega_{\max}$	$\text{rad.s}^{-1}$	maximální (kritická) hodnota úhlové rychlosti

## Seznam zkratek

ZKRATKA	POPIS
ASM	<b>A</b> Synchronní <b>M</b> otor
BMS	<b>B</b> attery <b>M</b> anagement <b>S</b> ystem – systém managementu baterie
CAD	<b>C</b> omputer <b>A</b> id <b>D</b> esign – konstruování pomocí počítače
DTC	<b>D</b> irect <b>T</b> orque <b>C</b> ontrol – přímé řízení momentu
EOC	<b>E</b> nd <b>O</b> f <b>C</b> harge – konec nabíjení
H <sub>2</sub>	Vodík
H <sub>2</sub> O	Voda
ICE	<b>I</b> nternal <b>C</b> ombustion <b>E</b> ngine – spalovací motor
IGBT	<b>I</b> nsulated <b>G</b> ate <b>B</b> ipolar <b>T</b> ransistor – bipolární transistor s izolovaným hradlem
KERS	<b>K</b> inetic <b>E</b> nergy <b>R</b> ecovery <b>S</b> ystem - systém rekuperace kinetické energie
LiFePO <sub>4</sub>	Lithium-železo-fosfátový akumulátor
LiFeYPO <sub>4</sub>	Lithium-železo-yttrium-fosfátový akumulátor
Lilon	Lithium-iontový akumulátor
LiMnO	Lithium-manganový akumulátor
LiPol	Lithium-polymerový akumulátor
MOSFET	<b>M</b> etal <b>O</b> xide <b>S</b> emiconductor <b>F</b> ield <b>E</b> ffect <b>T</b> ransistor – polem řízený transistor
NiCd	Nikl-kadmiový akumulátor
NiMH	Nikl-metal-hydridový akumulátor
O <sub>2</sub>	Kyslík
Pb	Olověný akumulátor
PEM	<b>P</b> roton <b>E</b> xchange <b>M</b> embrane - protonová membrána palivového článku
PWM	<b>P</b> ulse <b>W</b> ide <b>M</b> odulation – pulsně šířková modulace
SMPM	<b>S</b> ynchronní <b>m</b> otor s <b>p</b> ermanentními <b>m</b> agnety
SOC	<b>S</b> tate <b>O</b> f <b>C</b> harge – stav nabití akumulátoru
SOE	<b>S</b> tate <b>O</b> f <b>E</b> nergy – energetický stav akumulátoru
UPS	<b>U</b> ninterruptible <b>P</b> ower <b>S</b> upply – záložní napájecí zdroj
VC	<b>V</b> ector <b>C</b> ontrol – vektorové řízení
WOT	<b>W</b> ide <b>O</b> pen <b>T</b> rottle – plné sešlápnutí pedálu

## Cíle disertační práce

V této disertační práci jsou stanoveny cíle, jež se zaměřují na teoretickou analýzu chování jednotlivých uzlů i celé soustavy elektromobilu či hybridního vozidla a jejich experimentální ověření na vhodné platformě vozidla. Tento hlavní záměr lze rozložit do následujících cílů:

- rozbor současného stavu komerčně řešených pohonných systémů elektromobilů a hybridních vozidel
- popis problematiky alternativních napájecích zdrojů a prostředků akumulace energie
- tvorba simulačních modelů pro modelování pohonných struktur a vybraných napájecích zdrojů
- návrh a realizace prototypů vhodných měničů
- realizace měřicího pracoviště výkonového zatěžování elektromobilů
- experimentální a simulační ověření zkoumaných koncepcí

## Úvod

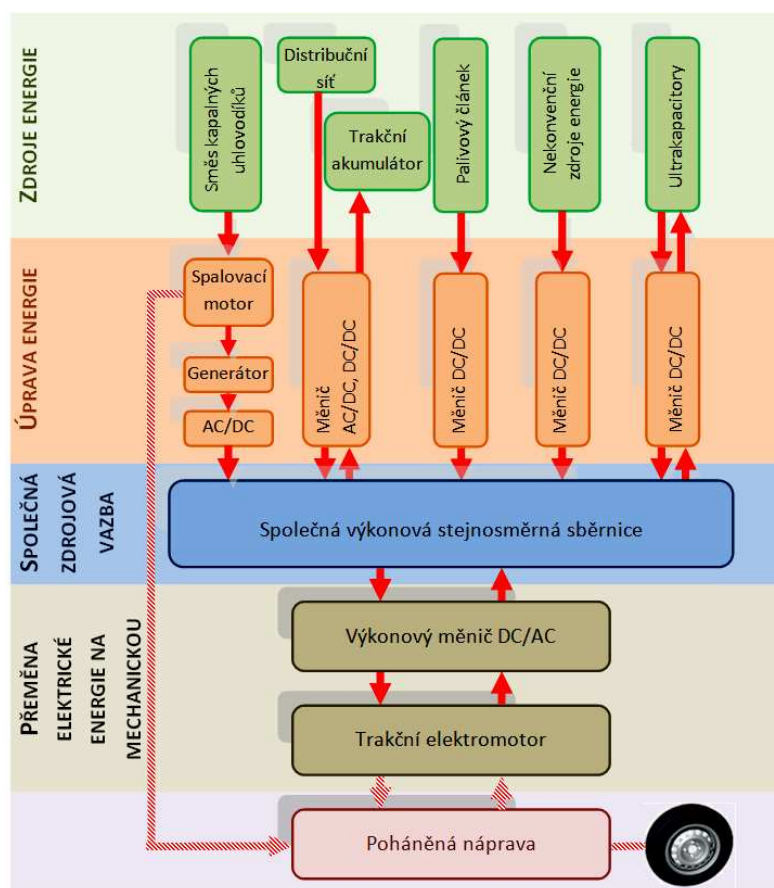
Vývoj posledních let, ať už v oblastech energetiky, vytápění nebo automobilovém průmyslu se zaměřuje na využití nových zdrojů, které by nahradily nebo snížily závislost na stávajících fosilních palivech. Škodlivé produkty hoření ropných produktů ve spalovacích motorech, CO - oxid uhelnatý, NO<sub>x</sub> - oxidy dusíku, HC - uhlovodíky, pevné částice a CO<sub>2</sub> – oxid uhličitý, představují s přibývajícím množstvím vozidel neúnosné zatížení na životní prostředí. Proto je velmi důležité tyto nepříjemné produkty hoření paliva postupně omezovat. I přes jisté rezervy, které spalovací motor má, situace není neřešitelná. Lze sledovat postupné prosazování automobilů s hybridním pohonem, na kterém má největší podíl automobilka Toyota. Ta v letech 1995 – 96 vyvinula prototyp hybridního automobilu Toyota Prius a od roku 1997 již na trhu představila svůj hybridní automobil první generace, který na počátku roku 2009 má již třetího nástupce. Také další automobilky nezaostávají ve vývoji, např. automobilka Honda uvedla na trh hybridní automobil Insight, automobilka Mercedes Benz představila na autosalonu v Detroitu C3000 Bluetech Hybrid a automobilka supersportů Ferrari vytvořila prototyp vozu s hybridním pohonem. (1) (2)

Obecně je hybridní pohon označení pro kombinaci několika energetických zdrojů, které společně pohánějí jeden dopravní prostředek. Při dnešním stavu techniky přichází v úvahu pro komerční trh zatím jen kombinace spalovacího motoru s elektromotorem a dvěma zásobníky energie, tedy palivovou nádrží a elektrickými akumulátory. Nejjednodušší formou hybridního pohonu je micro-hybrid, doplněný o jednotku startér-generátor, která umožňuje funkci Start&Go. Ta při zastavení vypíná chod motoru a následně ho spouští při rozjezdu. Plně hybridní automobily můžeme podle jejich uspořádání pohonné jednotky rozdělit do tří základních skupin: sériové, paralelní a smíšené hybridní pohony. U sériového uspořádání pohonu se veškerý výkon spalovacího motoru převádí pomocí generátoru na elektrickou energii, která je uložena v bateriích, a vlastní pohon kol je poté obstaráván pouze elektromotorem. Paralelní hybrid má oba motory propojeny s hnacími koly a podle jejich konkrétního zapojení se buď každý samostatně, nebo společně starají o pohon vozu. Za smíšený hybridní pohon je považováno uspořádání, kdy spalovací motor může buď pouze pohánět kola, nebo vyrábět elektrickou energii, anebo obojí současně.

Směr vývoje hybridních technologií se zaměřuje na zkvalitňování a zvyšování účinnosti jednotlivých komponentů pohonných jednotek vozidel. Konvenční spalovací motor byl upraven tak, aby pracoval v optimálním režimu, tj. při dokonalém spalování paliva, a tak vytvářel co nejméně škodlivých emisí. K tomuto motoru byl poté přidán jeden nebo více elektromotorů, které mají primární úkol pokrývat dynamické špičky momentu při akceleraci a deceleraci. V neposlední řadě je možné tyto motory využívat v inverzním (generátorickém) režimu a energii vznikající při brzdění vozidla ukládat do zásobníku – akumulátorové baterie, nebo jiných úložišť energie.

Vývoj v automobilovém průmyslu se zaměřuje na čistě elektrický pohon napájený z akumulátoru. Již v roce 1895 v Praze představil první elektromobil František Křižík. Elektromobily u nás dokonce jezdily dříve než vozy se spalovacím motorem, nicméně upadly v zapomnění a až v posledních letech opět zažívají renesanci. Hlavní nevýhodou elektromobilů je jejich omezená

dojezdová vzdálenost. Tento parametr závisí převážně na typu a kapacitě použitých baterií, typu motoru pohonné jednotky a v neposlední řadě na trakčním měniči elektrické energie. Ve vývoji trakčních baterií lze zaznamenat značný pokrok. V dnešní době již máme pro elektromobily dostatečně výkonné baterie, jako například typu LiFePO<sub>4</sub>. I přesto však vývoj není ukončen a snaha vyvinout výkonnou lehkou baterii stále pokračuje. Oblast trakčních motorů používaných v elektromobilech či hybridních automobilech jsou v dnešní době na vysoké úrovni, ať už se jedná



Obrázek 1: Vícezdrojový systém pohonu vozidla

o synchronní, či asynchronní motory. Tyto stroje dosahují účinnosti přeměny elektrické energie na mechanickou přes 95%. Stejně jako u akumulátorů, je i u motorů snaha je vyvinout co nejvýkonnější a nejúčinnější. Posledním komponentem v trakční linii baterie – motor je výkonový měnič. Z pohledu konstruktérů výkonových polovodičových měničů je tato oblast stěžejní. Vhodnou volbou a konstrukcí můžeme zvýšit nejen dynamiku pohonu, ale také účinnost celého zařízení a tedy i dojezd vozidla. (3) (4)

V neposlední řadě je pro vývoj hybridního vozidla důležitá návrhová fáze simulující budoucí chování vozidla. Simulace a modelování hybridních a elektrických vozidel přináší důležitou roli před započítáním vývoje a výroby prototypu vozidla. Pro realistický model pohonné soustavy elektromobilu nebo hybridního automobilu existují různé softwarové nástroje. Mezi nejpoužívanější se řadí program Matlab® a jeho vývojové simulační prostředí Simulink®. Vytvoření věrného modelu pohonného systému je podmíněno zvládnutím fyziky a mechaniky pohonu vozidla a taktéž vyžaduje vytvoření knihoven modelů vozidla. Správa energií ve vozidle a způsob

řízení vzájemné distribuce mezi zdrojovými jednotkami (*Obrázek 1*) pro získání nejvyšší účinnosti pohonné jednotky je hlavní know-how výzkumných pracovišť. (1) (5) (6)

V návaznosti na reprezentativní literaturu se tato disertační práce zabývá popisem zdrojových struktur, jejich simulací v programu Matlab® Simulink® a následnými experimentálními výsledky. Téma bylo zvoleno z důvodu rostoucího podílu hybridních vozidel a elektromobilů na trhu, které již nejsou pouze laboratorními prototypy. O aktuálnosti zvoleného tématu svědčí i nedávno konaná konference VPPC 2010 - Vehicle Power and Propulsion Conference a také v březnu konaný Autosalon v Ženevě, na kterém se představilo mnoho automobilek s hybridním vozidlem, či elektromobilem.

Práce je rozdělena do šesti oddílů. První část je věnována popisu zdrojů elektrické energie užitých v hybridních vozidlech. Tyto zdroje jsou rozděleny do dvou kategorií na zdroje poskytující dlouhodobou dodávkou energie (spalovací motor, akumulátor, palivový článek, fotovoltaika), jenž mají uplatnění jako hlavní pohonné zdroje nebo stacionární napáječe. Druhou skupinu tvoří komponenty pro krátkodobou dodávku a akumulaci energie, zastoupené ultrakapacitorovým článkem a setrvačnickovým akumulátorem. Druhá část disertační práce se zabývá fyzikálním rozbohem hnací síly vozidla skládající se z jednotlivých jízdních odporů. Dále jsou programem Matlab® Simulink® popsány modelové soustavy pohonných systémů a zdrojů. Třetí část disertační práce popisuje vozidlo CityEL, jeho základní parametry a tři vývojové etapy vozidla realizované při řešení této práce. Čtvrtá část nastiňuje simulační výsledky vozidla při simulaci jízdy dle jízdního profilu zadaného z programu GoogleEarth a simulaci vozidla na válcové zkušební výkonu. Pátá kapitola dokumentuje experimentální výsledky vozidla při testovacích jízdách s pohonným systémem z olověných akumulátorů a stejnosměrného motoru, dále testy při napájecí jednotce sestavené z ultrakapacitorových článků. Kapitulu uzavírají experimentální výsledky pohonné soustavy sestávající se z LiFePO<sub>4</sub> akumulátorů, třífázového střídače a SMPM motoru, jež byla měřena na válcové zkušební výkonu. Závěrečným oddílem této práce jsou přílohy obsahující seznam nejpoužívanějších symbolů při sestavování modelů v programu Matlab® Simulink®, fotografickou dokumentaci z rekonstrukce vozidla CityEL, montáže balančních jednotek a z testování pohonných soustav na experimentálním vozidle.

Záměrem této práce je teoretická analýza chování jednotlivých uzlů i celé soustavy elektromobilu či hybridního vozidla, vytvoření simulačních modelů a jejich experimentální ověření na platformě vozidla CityEL.

# 1 Zdroje elektrické energie hybridních soustav

## 1.1 Zdroje pro dlouhodobou dodávku energie

### 1.1.1 Spalovací motor

Využití spojení spalovací motor – elektromotor (generátor) se s výhodou využívá v hybridních automobilech, kde spalovací motor (ICE) pracuje v téměř optimálním režimu a to z hlediska, jak dokonalého spalování, tedy zvýšení účinnosti motoru, tak snížení škodlivých emisí. V hybridním uspořádání lze s výhodou využívat výhody jednotlivých pohonů, jako například kompenzaci postupného nárůstu momentu u spalovacího motoru, motorem elektrickým, který má při vhodně zvoleném řízení maximální moment na hřídeli již od nulových otáček. Elektropohon má nízkou hlučnost, žádné výfukové zplodiny a vysokou účinnost elektromotoru (až 98 %). Mezi největší výhodu tohoto kombinovaného pohonu patří možnost využití jednotlivých pohonů v oblasti nejvyšší účinnosti, čímž se zajišťuje snížení spotřeby energie. Nevýhodou pohonu jsou vysoké pořizovací náklady, zvýšení hmotnosti vozidla přidáním dalšího motoru – elektromotoru, výkonového měniče a akumulátorů a zmenšení úložných prostorů ve vozidle.

Do vývoje hybridního pohonu investuje značné částky například japonská firma Toyota,



Obrázek 2: Hybridní motor třetí generace Toyota Prius (36)

kteřá má cíl prodávat hybridní vozy ve velkém. Na začátku roku 2009 představila tato automobilka na autosalonu v Detroitu již třetí generaci hybridního vozu Toyota Prius (Obrázek 2). Konstrukce hybridních automobilů jsou technicky řešitelné za předpokladu využití nejmodernějších technologií výkonových měničů<sup>1</sup>, podpořených vysokou hustotou integrace a výpočetního výkonu

---

<sup>1</sup> Semikron® – Modulární výkonové systémy pro elektromobily a hybridní automobily SKAI IGBT System. 3 fázové IGBT střídače s výkonem do 250kVA, krytím IP67, s integrovanými napěťovými, proudovými a teplotními senzory, driversy s IGBT ochranou, plně programovatelným signálovým mikroprocesorem, s EMI filtrací a kapalinovým chlazením.

v řídicích systémech, které jsou nezbytnou součástí řešení. Ukazuje se, že průmyslová úroveň a spolehlivost jmenovaných systémů je v současnosti postačující a lze předpokládat rychlý nárůst vozidel této koncepce. (7)

### 1.1.2 Akumulátory

Akumulátor chápeme obecně jako zdroj energie, který dává stejnosměrný proud, který je možno opětovně dobít. Může pracovat na různých principech – tepelné, chemické či jiné akumulace energie. Spíše než s pojmem akumulátor se v běžném životě potkáme s nesprávně užívaným pojmem baterie. Životnost většiny chemických akumulátorů se pohybuje kolem 3 let (přibližně 1000 nabíjecích cyklů), olověný akumulátor může vydržet i déle. Tento parametr je rozdílný pro jednotlivé druhy akumulátorů a jejich výrobců. Po dobu životnosti postupně klesá kapacita akumulátoru kvůli chemické korozi elektrod. Kapacitou akumulátoru rozumíme schopnost dodat určité množství elektrické energie ve stanovené době až do poklesu napětí vybitého článku na nejnižší povolenou hranici.

Akumulátory se využívají v mnoha strojích a zařízeních, jako pomocný zdroj energie. Olověné akumulátory jsou součástí prakticky každého automobilu, kde plní roli zdroje pro 12 V stejnosměrný palubní rozvod a jsou zdrojem pro startér. Akumulátory pohánějí klasické ponorky, jsou prováděny i pokusy s pohonem mnoha dalších dopravních prostředků. Důležité je i využití ve spotřební elektronice malých výkonů (mobilní telefony, notebooky, měřicí přístroje, ...).

#### 1.1.2.1 Druhy chemických akumulátorů

Na Katedře elektroniky se pracuje v rámci vývoje elektromobilů s bateriemi dvou typů. První elektromobil Tatra Beta EL byl osazen olověnými bateriemi s tekutým elektrolytem. Tyto baterie mají velmi vysokou hmotnost, značné samovybití a vyžadují stálou údržbu. Druhým používaným typem jsou moderní  $\text{LiFePO}_4$  akumulátory. Tyto články jsou mnohem lehčí, což je první výhoda pro použití v elektromobilu, dále jsou naprosto bezúdržbové a jsou bezpečné pro použití v trakci z hlediska vibrací a otřesů.

Akumulátory  $\text{LiFePO}_4$  (Obrázek 53) jsou novou generací lithium iontových nabíjecích baterií postavené na bázi lithium-železa-fosfátu. Toto označení získaly díky katodě vyrobené z tohoto materiálu. Anoda je jako u ostatních li-ion baterií vyrobena z uhlíku. Mezi jejich hlavní přednosti oproti klasickým lithium iontovým akumulátorům patří především schopnost dodat vyšší proud a to, že při extrémních podmínkách nevybuchují. Nominální napětí  $\text{LiFePO}_4$  článků je zhruba 3,2 V (mezi 3,0 až 3,3 V), maximální nabíjecí napětí je 4,25 V. Minimální napětí, na které je možné článek vybit je obvykle 2,5 V. Některé akumulátory jsou schopny dodat pracovní proud impulsně desetinásobek své kapacity s životností více jak 2000 cyklů. Lze je použít v rozmezí teplot  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Samovybíjecí efekt a paměťový efekt u těchto akumulátorů prakticky neexistuje a je možné je nabít v jakémkoliv stavu vybití. Bezpečnost  $\text{LiFePO}_4$  akumulátorů vyplývá z vlastností tohoto materiálu a jsou tedy velmi bezpečné a stabilní. Z uvedených mechanických i elektrických vlastností je patrné, že tyto akumulátory jsou velmi vhodné pro nasazení v elektromobilech, či hybridních automobilech.



Tabulka 1: Nejpoužívanější typy akumulátorů

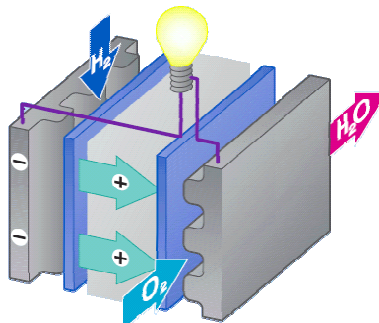
	Typ	Charakteristika a užití
<b>Pb</b>	<b>Olověné</b>	Olověný akumulátor je galvanický článek s elektrodami na bázi olova, jehož elektrolytem je kyselina sírová. Využití pro záložní zdroje (UPS), startovací autobaterie, v trakci, pro golfová vozítka nebo vysokozdvizné vozíky. Nevýhoda těchto akumulátorů je jejich hmotnost a proto se od nich upouští i pro využití v elektromobilech.
	Olověný, kyselý typ	
	Olověný, gelový typ	
<b>NiCd</b>	<b>Niklové</b> Nikl-kadmiový	Nikl-kadmiové baterie (Ni-Cd) využívají nikl a toxické kadmium, které značně zatěžuje životní prostředí. Nikl-metalhydridové nahrazují toxické kadmium směsí jiných kovů, čímž je při stejné velikosti akumulátorů dosaženo cca o 40% vyšší kapacity. Nevýhoda těchto akumulátorů je jejich hmotnost a paměťový efekt.
<b>NiMH</b>	Nikl-metal-hydridový	
<b>Lilon</b>	<b>Lithiové</b> Lithium-iontový	Kvůli vysoké hustotě energie vzhledem k objemu se hodí pro přenosná zařízení. V současnosti je to v této oblasti asi nejvíce používaný typ. Jmenovité napětí jednoho článku je 3,3 - 3,6 V a nabíjí se napětím 4,2 V. Hlavními výhodami akumulátorů tohoto typu je velmi vysoká hustota energie, nemá paměťový efekt a má velmi nízkou hodnotu samovybíjení. Mezi nevýhody typu Li-ion patří stárnutí a pokles kapacity baterie, nutnost přesného nabíjení a nebezpečí výbuchu a vznícení.
<b>LiPol</b>	Lithium-polymerový	
<b>LiMnO</b>	Lithium-manganový	
<b>LiFePO<sub>4</sub></b>	Lithium-železo-fosfátový	
<b>LiFeYPO<sub>4</sub></b>	Lithium-železo-yttrium-fosfátový	Absolutní novinkou v oblasti baterií jsou akumulátory LiFeYPO <sub>4</sub> , které se objevily na trhu v druhé polovině roku 2009. Jde o zcela nové baterie obsahující elektrodu vyrobenou yttria, která částečně nahrazuje železo v předchozích LiFePO <sub>4</sub> čímž má nový typ baterie nižší váhu a delší životnost při stejných rozměrech článku. (2)

*Specifikace LiFePO<sub>4</sub> akumulátoru (40Ah): (8)*

- Pracovní napětí ..... 3,0 V až 3,3 V
- Minimální vybíjecí napětí..... 2,5 V
- Maximální nabíjecí napětí..... 4,25 V
- Objemová energetická hustota..... 220 Wh.l<sup>-1</sup>
- Standardní nabíjecí a vybíjecí proud..... 12 A
- Maximální pulsní vybíjecí proud ..... 400 A
- Maximální vybíjecí proud trvalý..... 120 A
- Cyklů do 70% stavu kapacity při hlubokém vybíjení ≥ 3000 cyklů
- Pracovní teplota ..... -25 °C – 70 °C
- Hmotnost článku..... 1,6 kg

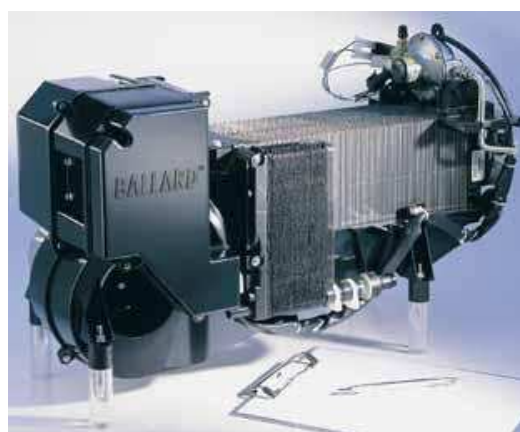
### 1.1.3 Palivový článek

Palivový článek je galvanický článek, který vyrábí elektřinu z energie uvolňované při chemické reakci (Obrázek 4). Palivem článku je vodík  $H_2$  (na anodové straně) a oxidant – kyslík  $O_2$  (na katodové straně).



Obrázek 4: Principiální schéma činnosti palivového článku (37)

Palivo a oxidant reagují, přičemž protony vodíku procházejí protonovou membránou (PEM) ke katodě a elektrony jsou nuceny „projít“ přes spotřebič (rozdíl potenciálu na anodě a katodě, protéká proud) k elektrodě s kyslíkem, kde rekombinují s protony vodíku za vzniku  $H_2O$ . Malé palivové články, například do notebooků nebo jiných elektronických přenosných zařízení, využívají jako palivo také různé alkoholy (9). Palivové články pracují obvykle s teplotami mezi 70 až 90 °C a tlakem 2 bary. V článku vzniká elektrické napětí, které je teoreticky okolo 1,23 V a závisí na typu paliva a kvalitě článku. U dnes nejpoužívanějších článků dosahuje nejčastěji napětí 0,5 - 0,95 V. Aby se dosáhlo vyššího napětí, zařazují se palivové články do série (Obrázek 3). Výkon článku závisí na ploše článku, konstrukci a kvalitě paliva, dnes komerčně dostupné články poskytují přibližně 0,5 W/cm<sup>2</sup>. Účinnost přeměny na elektrickou energii v palivovém článku je 40 – 45% a je obvykle považována za jednu ze základních výhod technologie palivových článků. Ačkoliv musíme být schopni rozlišit mezi účinností samotného palivového článku a účinností celého jeho systému.



Obrázek 3: Palivový článek NEXA od firmy Ballard (38)

Tento systém se skládá z palivového článku a měniče s možností akumulace energie. Dále soustava může být vybavena výstupním blokem s jednofázovým nebo třífázovým střídačem. Měnič, který je zařazen bezprostředně za palivovým článkem, musí splňovat několik funkcí: úprava napěťových hladin, dodávka energie v čase rozběhu článku a možnost přijetí rekuperované

energie dodávané spotřebičem. Proto je tento měnič často vybaven ultrakapacitorovou baterií, která dokáže ve velice krátkém čase vydat nebo dodat potřebnou energii. (10)

#### 1.1.3.1 Využití palivových článků v praxi

- Automobilka Honda představila svůj prototyp Honda FCX poháněného palivovými články. Maximální rychlost tohoto vozu je  $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , dojezd automobilu 570 km a disponuje výkonem 97 kW (129 hp). (11)
- Vývoj technologií palivových článků pro automobilový průmysl byl v Americe zpomalen z důvodu tzv. "vodíkové ekonomiky", v které odborníci poukazují na příliš vysoké finanční i ekologické náklady na výrobu vodíku a následně i palivových článků. Nynější vývoj se zaměřuje převážně na rozvoj plug-in hybridních automobilů a také do výzkumu stacionárních palivových článků, které by mohly sloužit například v domácnostech v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie.
- První vodíkový autobus (Obrázek 5) v České republice a zároveň první autobus s vodíkovými palivovými články vyvinutý ve střední a východní Evropě, vyrobila plzeňská ŠKODA ELECTRIC, Ústav jaderného výzkumu Řež, Proton Motor a Veolia Transport. Autobus může čerpat energii hned ze tří zdrojů – z palivového článku, z akumulátorů a z ultrakapacitorů. Základním zdrojem energie je elektřina z palivových článků (48kW), dále baterie Lilon (max. 100 kW, 26 kWh) pro ukládání energie z palivových článků a pokrytí energetických nároků v náročnějších jízdních režimech a ultrakapacitory (8 F, 780 V, max. 200kW) pro rekuperaci energie při brzdění a k pokrytí proudových špiček při rozjezdu (12).

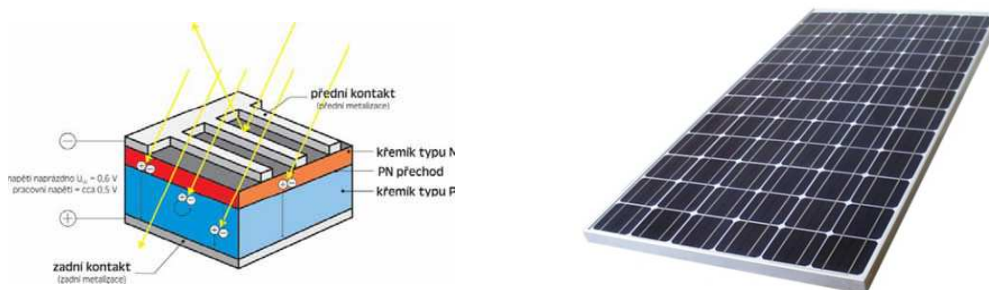


Obrázek 5: Autobus TriHyBus s pohonem s palivovými články (12)

#### 1.1.4 Fotovoltaická energie

Fotovoltaický článek je velkoplošná polovodičová součástka schopná přeměňovat elektromagnetické záření viditelného spektra - světlo na elektrickou energii. Velká část dnes používaných článků je vyráběná z monokrystalického (případně polykrystalického) dopovaného P křemíku (Obrázek 6). Polykrystalické křemíkové ingoty se vyrábějí se čtvercovým průřezem, vhodným pro výrobu solárních článků. Kulaté monokrystalické ingoty se často ořezávají na čtvercový průřez, aby byla lépe využita plocha solárních panelů. Ingoty jsou rozřezány na tenké

destičky, na nichž je poté leptáním vytvořena textura, čímž se destička zmatní a lépe pohlcuje záření. Dále je destička dopována fosforem, čímž se vytvoří polovodivý P-N přechod. Na závěr se článek opatří antireflexní nitridovou vrstvou. Hotové články se spojují převážně do série a montují se do fotovoltaických panelů.



Obrázek 6: Princip činnosti fotovoltaického panelu a jeho konečná úprava (39)

Energie fotonu, která překračuje potřebnou hranici pro výrobu elektřiny, se mění v teplo. Ve fotovoltaickém článku lze tak na elektřinu přeměnit teoreticky maximálně 50% dopadajícího záření - světla. Prakticky se dosahuje účinnosti asi 15 – 18% u průmyslově vyráběných článků. U experimentálních laboratorně vyráběných článků se dosahuje účinnosti až 30%. Z výše uvedeného je zřejmé, že fotovoltaické články v automobilovém průmyslu a konkrétně pro elektromobily, najdou využití převážně jako statické dobíjecí stanice. Využití těchto článků přímo na vozidle, uvažujeme-li například novou technologii ohebných článků, je sice možné, nicméně zatím jejich výkony nedosahují takových hodnot, aby měly zásadní vliv na dojezd vozidla.

#### 1.1.4.1 Využití solárních článků v automobilovém průmyslu

- V rozšířené výbavě nového hybridu Toyota Prius najdeme mimo jiné také střešní solární panely (Obrázek 7). Ty poslouží v případech, kdy bude auto zaparkované na slunci k produkci energie pro motor ventilačního systému, který zajistí uvnitř automobilu příjemnou teplotu. Solární panel pro Toyota Prius se skládá z 36 solárních článků s účinností 16,5% s maximálním výkonem panelu 50 W<sub>p</sub>.
- Toyota už nyní připravuje vlastní solární dobíjecí stanice (Obrázek 7), které budou dobíjet testovací flotilu třetí generaci hybridu Toyota Prius plug-in hybrid.

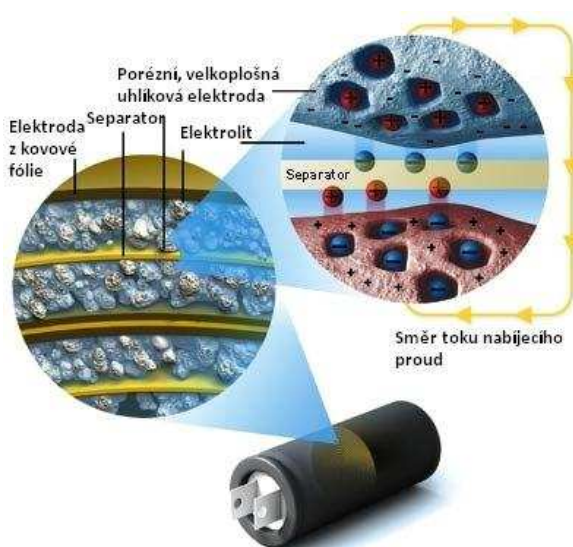


Obrázek 7: Dobíjecí stanice pro elektromobily a Toyota Prius s fotovoltaickými panely zabudovanými do střechy (54) (55)

## 1.2 Komponenty pro krátkodobou akumulaci energie

### 1.2.1 Ultrakapacitorový článek

Elektrickou energii ve velkém množství doposud nelze skladovat. Pro uskladnění malého množství energie (10–100 Wh/kg) však existuje řada možností, jakými je například chemická přeměna, či uložení formou elektrického popřípadě i magnetického pole. Elektrochemické akumulátory mají výhodu ve vysoké měrné energii, ovšem naproti tomu nejlepší měrný výkon poskytují klasické kondenzátory. Spojením výhodných vlastností obou technologií vzniká ultrakapacitor, který je také někdy nazýván elektrochemickým dvouvrstvým kondenzátorem. Z tohoto označení vyplývá také funkce, jež spočívá ve vytvoření elektrochemické dvouvrstvy (Obrázek 8), vznikající po přiložení napětí na elektrody ponořené ve vodivé tekutině. Stejně jako u běžného kondenzátoru je i zde energie uchovávána v elektrostatickém poli.



Obrázek 8: Vnitřní struktura ultrakapacitoru (13)

Ultrakapacitor má 10 až 20 krát vyšší měrný výkon oproti baterii a vyznačuje se podstatně kratší nabíjecí i vybíjecí dobou. V porovnání s běžným kondenzátorem je jeho přední výhodou měrná energie, která je až 100 krát vyšší. Srovnáme-li jej ovšem s chemickým akumulátorem je asi 100krát nižší. Svými parametry leží tedy ultrakapacitor v oblasti mezi baterií a elektrolytickým kondenzátorem. Významným kladem ultrakapacitoru je jeho bezproblémová funkce při nízkých teplotách (až do  $-40^{\circ}\text{C}$ ). Na rozdíl od baterie je také zcela bezúdržbový a ani následná likvidace není problematická. Ultrakapacitory nejsou zvláště citlivé na způsoby nabíjení a vybíjení a vyznačují se velmi malým vnitřním odporem a netrpí tzv. paměťovým efektem. (14)

V praxi se nejčastěji používá sériové propojení článků (Obrázek 9), a to z důvodu malého napětí jednoho článku. Tímto způsobem se sice zvýší účinnost ukládání energie, jelikož při stejném výkonu klesne proud a tudíž i ztráty, ale nastává problém s přebíjením článků o nižší kapacitě.

Ultrakapacitory se využívají především jako sekundární zdroje energie. Ultrakapacitorová baterie musí být doplněna balanční (vyvážovací) jednotkou, která hlídá napětí na každém článku ultrakapacitorové baterie. Dále musí být ultrakapacitorová baterie doplněna o výkonový DC/DC





Obrázek 9: Kondenzátorová baterie 176 F/46 V

měníč, který upravuje napěťové hladiny na vstupu a výstupu a řídí nabíjecí a vybíjecí proudy kondenzátorové baterie, které mohou dosahovat až stovek ampérů.

#### 1.2.1.1 Využití ultrakapacitorových článků

Jak již bylo popsáno v odstavcích výše, ultrakapacitorové články již mají své místo ve výkonové elektronice. V komerční sféře se ultrakapacitorové baterie vyskytly například v aplikaci vodíkového autobusu TriHyBus vyvinutého firmou Škoda Electric (Obrázek 5). V rámci vědeckovýzkumné činnosti bylo provedeno experimentální měření na testovacím vozidle CityEL s využitím ultrakapacitorů jako primárního zdroje napětí.

#### 1.2.2 Setrvačnickový akumulátor

Setrvačník (angl. Flywheel) patří mezi nejnovější technologie pro krátkodobé uchovávání energie. Kinetická energie rotujícího tělesa je úměrná momentu setrvačnosti a druhé mocnině otáček. Při vysokých otáčkách má i relativně lehký setrvačník hodně energie. Velmi pevné kompozitní materiály dovolují vývoj lehkých vysokootáčkových setrvačníků až do  $100\,000\text{ min}^{-1}$ .



Obrázek 10: Uspořádání pohonné jednotky v hybridním závodním voze Porsche GT3R (15)

1 - výkonový měnič, 2 – SMPM, 3 – silový kabel, 4 – setrvačnickový akumulátor, 5 - měnič

Setrvačník jako zásobník energie využívá dráhový prototyp sportovního vozu Porsche 911 GT3 (Obrázek 10). Jedná se o systém využití rekuperované energie při brzdění – KERS. Zatímco

zadní kola pohání klasický plochý šestiválec 4,0 l o výkonu 353 kW (480 k)/ 7250 min<sup>-1</sup>, na přední nápravě jsou dva trakční kapalinou chlazené synchronní elektromotory, každý o výkonu 60 kW a maximálních otáčkách 15000 min<sup>-1</sup>, využívající energie ze setrvačnickového akumulátoru, jenž mění elektrickou energii na kinetickou. Když vůz brzdí, pracují elektromotory jako generátory a roztáčejí setrvačník. Když vůz akceleruje, setrvačník přeměňuje kinetickou energii znovu na elektrickou a ta napájí elektromotory. (15)



*Obrázek 11: Setrvačnickový akumulátor Porsche (15)*

Ve vozidle je na místě spolujezdce v hermetické skříni umístěn olejem chlazený setrvačnickový akumulátor (*Obrázek 11*) sestávající se ze synchronního stroje s permanentními magnety na rotoru. Celková hmotnost setrvačnicku činí 48 kg, provozní otáčky jsou 28 000 – 40 000 min<sup>-1</sup> a využitelné energie činí 200 Wh. Největší výkon 120 kW na jedno nabití lze využít po dobu 6 až 8 sekund. (15)

## 2 Fyzikální rozbor

Nárůst vozidel předpovídá důležitost výpočtových metod pro určení jejich parametrů. Výkonné počítače dnešní doby poskytují dostatečný výpočetní výkon pro rychlé dosažení simulačních výsledků potřebných pro konstrukci a parametrizaci pohonu vozidla. Díky těmto informacím konstruktér vybere motor potřebného výkonu, navrhne akumulátorovou sestavu jak s ohledem na typ baterií a celkovou kapacitu, tak i na zástavbový prostor ve voze a celkovou hmotnost. V této kapitole budou představeny matematické výrazy a postupy pro definování jízdních odporů a trakční síly vozidla a popis vlastností pohonných soustav vozidla a jeho napájecích zdrojů v simulačním programu MATLAB® SIMULINK®.

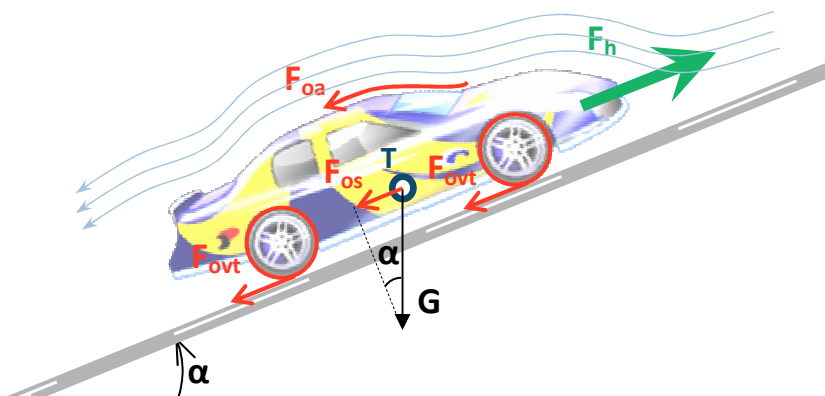
Prvními parametry, které budeme simulovat, jsou odpory jízdy vozidla a z nich určující požadovaný výkon, který nám udává akceleraci a nejvyšší rychlost vozidla, tj. parametry vozidla, určující jeho jízdní vlastnosti. Výkon elektrických vozidel není hlavní překážkou jejich širšího rozšíření. Hlavním omezujícím parametrem je dojezd elektromobilů na jedno nabití akumulátorů.

### 2.1 Hnací síla

První krok při modelování výkonu vozidla je vytvoření rovnice definující hnací sílu. Tj. síly, která pohání vozidlo vpřed a působí mezi zemí (vozovkou) a koly automobilu.

Uvažujeme hmotnost vozidla  $m$ , rychlost  $v$ , strmost svahu danou úhlem  $\alpha$ , (Obrázek 12), pak síla  $F_h$  pohánějící vozidlo musí překonat následující jízdní odpory:

- aerodynamický odpor -  $F_{oa}$
- odpor stoupání -  $F_{os}$
- odpor valivého tření -  $F_{ovt}$
- odpor zrychlení -  $F_{oz}$

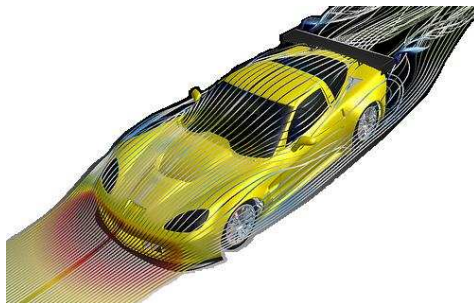


Obrázek 12: Odporové síly působící na vozidlo během jízdy



### 2.1.1 Aerodynamický odpor

Aerodynamický odpor vzniká při jízdě, protlačování vozidla vzduchem, kdy je karoserie v horní části vzduchem obtékána a ve spodní je vzduch protlačován mezi vozovkou a karoserií. Proudnic se za vozidlem neuzavírají, ale nastává víření. (Obrázek 13).



Obrázek 13: Simulace proudnic odtékající vozidlo (40)

Velikost této síly je dána povrchem a především tvarem karoserie a třecích sil, které působí v tečném směru proudění vzduchu kolem karoserie. Další složka aerodynamického odporu je způsobena nestejností tlaku nad a pod vozidlem (nad vozidlem je velký podtlak, pod vozidlem mírný přetlak). V celkovém aerodynamickém odporu vozidla jsou zahrnuty také odpory, které vznikají při průchodu vzduchu chladicím a větracím systémem a odpory vznikající vířením a třením vzduchu u otáčejících se kol vozidla.

Z běžného aerodynamického vztahu určíme celkový odpor

$$F_{oa} = \frac{1}{2} \rho c_x A_x (v + v_0)^2 \quad (\text{N; kg} \cdot \text{m}^{-3}, -, \text{m}^2, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}), \quad [3.1]$$

kde  $v$  je náporová rychlost proudění vzduchu, neboli rychlost vozidla,  $v_0$  rychlost protivětru,  $\rho$  je hustota vzduchu  $1,25 \text{ kg/m}^3$  (tlak vzduchu  $p_0 = 1013 \text{ hPa}$ , teplota  $t_0 = 15 \text{ °C}$ ),  $c_x$  aerodynamický koeficient a  $A_x$  je čelní plocha vozidla (Tabulka 2). Síla odporu vzduchu  $F_{oa}$  roste se druhou mocninou rychlosti a brzdný výkon odporu vzduchu  $P_{ov}$  je úměrný třetí mocnině rychlosti. Hodnoty součinitele odporu vzduchu  $c_x$  závisí především na tvaru vozidla a určují se měřeními v aerodynamickém tunelu.

Tabulka 2: Hodnoty aerodynamického koeficientu a čelní plochy vozidla (16) (17)

Typ vozidla	$c_x$ [-]	$A_x$ [m <sup>2</sup> ]
osobní vozy	0,3 – 0,4	1,6 – 2,0
- Škoda Octavia 2001	0,29	
- Opel Corsa	0,32	
- Peugeot 305 GTX	0,38	
- Audi A4 2001	0,28	
- BMW X1, X3, X6	0,32, 0,35, 0,34	
sportovní vozy	0,3 – 0,35	1,3 – 1,6
závodní vozy – krytá kola	0,25 – 0,35	0,8 – 1,5
autobusy	0,5 – 0,7	5 - 7
nákladní vozy s návěsem	1,0 – 1,2	9

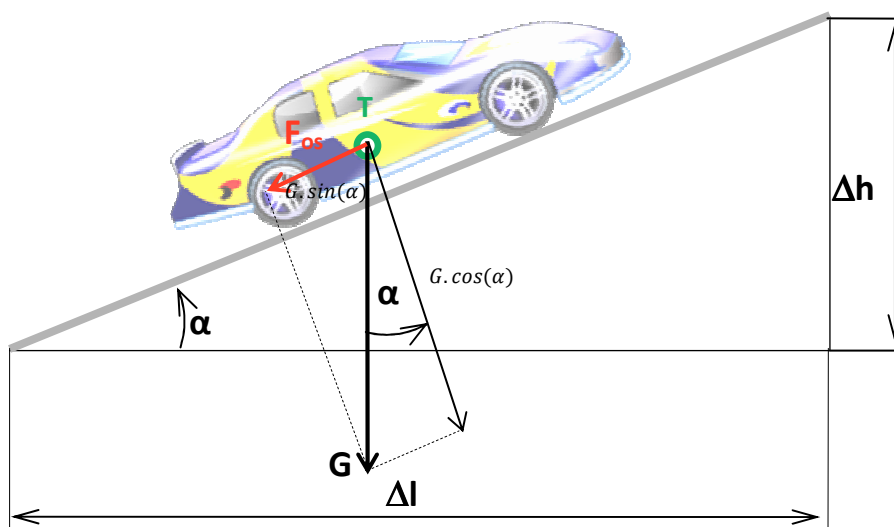
U osobních automobilů lze součinitel aerodynamického odporu značně snížit vhodným provedením přídě se zaoblenými tvary a proudnicovým tvarem zádě vozidla, kdy lze docílit hodnoty  $c_x$  kolem 0,3. Zakrytím spodní části podvozku<sup>2</sup> (kryt motoru, zavěšení kol, tunelu výfukového potrubí, atd.) a krytů kol zmenšuje hodnotu  $c_x$  asi o 0,05. (16) (18) (19) (20)

Ztrátový výkon daný aerodynamickým odporem je určen vztahem:

$$P_{oa} = F_{oa} v = \frac{\rho c_x A_x v^3}{2} \quad (W; \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, -, \text{m}^2, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad [3.2]$$

### 2.1.2 Odpor stoupání

Složka vektoru odporu stoupání je rovnoběžná s rovinnou vozovky a je vyjádřena z rozkladu tíhy vozidla dle sinové složky úhlu stoupání  $\alpha$  (Obrázek 14).



Obrázek 14: Rozklad sil odporu stoupání

Poté matematické vyjádření bude:

$$F_{os} = \pm G \sin(\alpha) \quad (N; N, \text{rad}), \quad [3.3]$$

kde  $G$  je celková tíha a  $\alpha$  je úhel svíráan mezi rovinou vozovky a vodorovnou rovinou, tzv. úhel stoupání. Síla odporu stoupání  $F_{os}$  působí v těžišti vozidla  $T$ . Znaménko „+“ v rovnici [3.3] platí při jízdě do svahu, znaménko „-“ při jízdě ze svahu, kdy sinová složka tíhy vozidla pohání automobil dopředu. V praktických výpočtech se místo úhlu stoupání setkáme s termínem sklon vozovky (stoupání)  $s$ , pro který podle (Obrázek 14) platí:

$$s = \frac{\Delta h}{\Delta l} = \text{tg}(\alpha) \quad (-; -, \text{rad}) \quad [3.4]$$

<sup>2</sup> Opel Insignia 2.0 CDTi Ecoflex. Ve větrném tunelu inženýři bojovali o každou desetinu koeficientu  $c_x$ . Již tak skvělý základ  $c_x=0,27$  se jim podařilo snížit o jednu desetinu. Zakrytí nádrže ze spodu vozidla ubralo 0,009, částečné zaslepení mřížky na masce ubralo 0,005, zaslepení šterbiny pod chladičem ubralo 0,001, úprava spoileru snížila koeficient o dalších 0,003. I taková bezvýznamná maličkost jako je plastický nápis na bočnici pneumatik Michelin Energy Saver zvýšila koeficient o 0,001 ve srovnání s holou maketou shodného rozměru i dezénu. (16)

Pro malé úhly je  $\sin(\alpha) \approx \tan(\alpha)$  a rovnici můžeme psát ve tvaru:

$$F_{os} = \pm Gs \quad (\text{N; N, -}) \quad [3.5]$$

Platnost tohoto vztahu je do hodnoty úhlu  $\alpha = 17^\circ$ , neboli pro stoupání  $s = 0,3 = 30\%$ , kdy rozdíl mezi  $\sin(\alpha)$  a  $\tan(\alpha)$  je asi 5%. Maximální stoupání silnice je 10 až 12% ( $5,7^\circ - 6,9^\circ$ ), na dálnici 6% ( $3,4^\circ$ ). (18) (19) (20)

Ztrátový výkon daný odporem stoupání je určen vztahem:

$$P_{os} = F_{os} v = \pm G \sin(\alpha) v \quad (\text{N; N, rad}) \quad [3.6]$$

### 2.1.3 Odpor valivého tření

Valivý odpor vzniká deformací pneumatiky a vozovky. Je-li vozovka tuhá, pak dochází jen k deformaci pneumatiky.

$$F_{ovt} = Z_k \xi = G \cos(\alpha) \xi = mg \xi \sqrt{1-s^2} \quad (\text{N; kg, m.s}^{-2}, -, -) \quad [3.7]$$

Zde  $\xi$  je koeficient valivého tření,  $Z_k$  je zatížení kol, respektive síla působící kolmo na rovinu vozovky,  $G$  je tíha vozidla,  $m$  hmotnost,  $\alpha$  úhel stoupání mezi rovinou vozovky a vodorovnou rovinou,  $g$  tíhové zrychlení a  $s$  je stoupání vozovky (viz předchozí kapitola).

Součinitel valivého odporu  $\xi$  závisí obzvláště na povrchu vozovky (Tabulka 3), dále na deformaci pneumatiky a na rychlosti kola.

Tabulka 3: Součinitel valivého odporu (21)

Povrch vozovky	$\xi$	Povrch vozovky	$\xi$
asfalt	0,01 – 0,02	mokrá polní cesta	0,08 – 0,20
beton	0,015 – 0,025	sucha polní cesta	0,04 – 0,15
dlažba	0,02 – 0,03	travnatý terén	0,08 – 0,15
makadam	0,03 – 0,04	hluboký písek	0,15 – 0,30
čerstvý sníh	0,20 – 0,30	bahnitá půda	0,20 – 0,40
ocel	0,0077	kola na kolejnici	0,001 – 0,002

Deformace pneumatiky závisí především na huštění, kde při menším tlaku vzduchu v pneumatice dochází k větší deformaci a tím ke zvětšení sil, které musejí touto pneumatikou po povrchu odvalovat, dojde tedy ke zvětšení valivého odporu. U osobních automobilů při rychlostech do  $80 \text{ km.h}^{-1}$  můžeme považovat součinitel valivého odporu nezávislý na jízdní rychlosti, při vyšších rychlostech dochází k nelineárnímu zvyšování odporu.

Další jízdní odpor vzniká při zatáčení vozidla, kdy se kola odvalují se směrovými úchytkami. Vliv ztrát třením v ložiskách kol obvykle neuvažujeme samostatně, ale zahrnujeme je k valivému odporu vozidla. (18) (19) (20)

Ztrátový výkon daný odporem valivého tření je určen vztahem:

$$P_{ovt} = F_{ovt} v = G \cos(\alpha) \xi v = mgv \xi \cos(\alpha) \quad (\text{W; kg, m.s}^{-2}, \text{m.s}^{-1}, -, \text{rad}) \quad [3.8]$$

## 2.1.4 Odpor zrychlení

Při zrychlování vozidla působí proti směru zrychlení setrvačná síla, kterou nazýváme odpor zrychlení  $F_{oz}$ . Tato síla je dána vztahem:

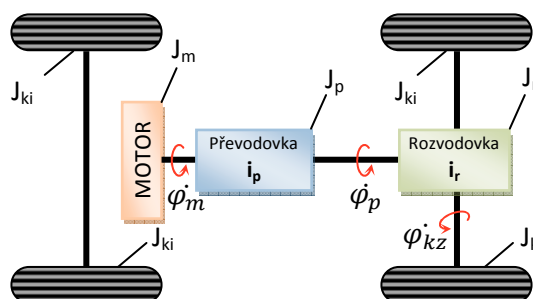
$$F_{oz} = F_{Zpos} + F_{Zrot} = \left( m + \sum_i \frac{J_{ki}}{r_{di} r_{ki}} \right) a \quad (\text{N; kg, kg.m}^2, \text{m, m, m.s}^{-2}) \quad [3.9]$$

Ze vztahu [3.9] je  $F_{Zpos}$  složka odporu zrychlení posuvné části,

$$F_{Zpos} = ma \quad (\text{N; kg, m.s}^{-2}) \quad [3.10]$$

a  $F_{Zrot}$  je odporem zrychlení rotačních částí.

$$F_{Zrot} = \sum_i \frac{J_{ki}}{r_{di} r_{ki}} a \quad (\text{N; kg.m}^2, \text{m, m, m.s}^{-2}) \quad [3.11]$$



Obrázek 15: Rotační části automobilu

Zvýše uvedených vztahů je  $r_k$  tzv. valivý poloměr kola, jenž je fiktivní veličina, která udává poloměr volně se valícího kola, které má stejnou úhlovou rychlost i stejnou dopřednou rychlost jako skutečné kolo. Poloměr dynamický  $r_d$  je skutečný poloměr kola, tj. vzdálenost daná kolmicí od středu kola k vozovce. Valivý poloměr je roven poloměru dynamickému ( $r_k = r_d$ ) nepřenáší-li kolo žádnou obvodovou sílu. Při přenosu hnacího momentu se poloměr valení  $r_k$  zmenší oproti dynamickému  $r_d$  vlivem prokluzu a tečné deformace. Naopak při přenosu brzdného momentu  $M_B$  se poloměr  $r_k$  naopak zvětší. Pokud hnací kolo prokluzuje na místě, bude valivý poloměr  $r_k = 0$ , pokud je kolo blokováno při prudkém brzdění, valivý odpor se bude blížit nekonečnu  $r_k \rightarrow \infty$ . Pro překonání odporu rotačních částí automobilu, je nutné přivést na kola vozidla moment  $M_{rot}$ , daný vztahem

$$M_{rot} = M_{rm} + M_{rp} + M_{rk} = F_{Zrot} r_d, \quad (\text{Nm; N, m}), \quad [3.12]$$

kde  $M_{rm}$  je moment na hnacích kolech vozidla potřebný na zrychlení rotujících částí motoru.

$$M_{rm} = J_m \varepsilon_M i_c \eta, \quad (\text{Nm; kg.m}^2, \text{rad.s}^{-2}, -, -), \quad [3.13]$$

kde  $J_m$  je moment setrvačnosti motoru

$\varepsilon_M$  úhlové zrychlení motoru

$i_c = i_p i_r$  celkový převod mezi motorem a hnacími koly,  $i_p$  je převod převodovky,  $i_r$  je převod rozvodovky.

$\eta$  mechanická účinnost

$M_{rp}$  je moment potřebný ke zrychlení částí převodového ústrojí.

$$M_{rd} = J_p \varepsilon_p i_r \eta \quad (\text{Nm; kg.m}^2, \text{rad.s}^{-2}, -, -) \quad [3.14]$$

$M_{rk}$  je moment potřebný ke zrychlení kol automobilu.

$$M_{rk} = \sum_i J_{ki} \varepsilon_{ki} \quad (\text{Nm; kg.m}^2, \text{rad.s}^{-2}) \quad [3.15]$$

Úhlové zrychlení kol vozidla můžeme vyjádřit v závislosti na podélném zrychlení, což je vyjádřeno vztahem:

$$\varepsilon_k = \frac{a}{r_k} \quad (\text{rad.s}^{-2}; \text{m.s}^{-2}, \text{m}) \quad [3.16]$$

Dosazením rovnic [3.13] až [3.16] do rovnice [3.12] dostaneme výraz:

$$M_{rot} = \left[ (J_m i_c^2 + J_p i_r^2) \eta + \sum_i J_{ki} \right] \frac{a}{r_k} \quad (\text{Nm; kg.m}^2, -, \text{kg.m}^2, -, -, \text{kg.m}^2, \text{m.s}^{-2}, \text{m}) \quad [3.17]$$

Výsledný odpor zrychlení je dán součtem odporů posuvných ( $O_{Zpos}$ ) [3.10] a rotačních částí ( $O_{Zrot}$ ) [3.11]

$$F_{oz} = ma + \frac{M_{rot}}{r_d} = ma + \frac{1}{r_d} \left[ (J_m i_c^2 + J_p i_r^2) \eta + \sum_i J_{ki} \right] \frac{a}{r_k} \quad (\text{N; kg, m.s}^{-2}, \text{m, kg.m}^2, -, \text{kg.m}^2, -, -, \text{kg.m}^2, \text{m.s}^{-2}, \text{m}) \quad [3.18]$$

Za předpokladu rovnosti valivého poloměru kola a skutečného poloměru kola ( $r_k \approx r_d$ ) můžeme předchozí rovnici psát v následujícím tvaru:

$$F_{oz} = \left[ 1 + \frac{(J_m i_c^2 + J_p i_r^2) \eta + \sum_i J_{ki}}{mr_d^2} \right] ma = \lambda ma \quad (\text{N; -, kg, ms}^{-2}) \quad [3.19]$$

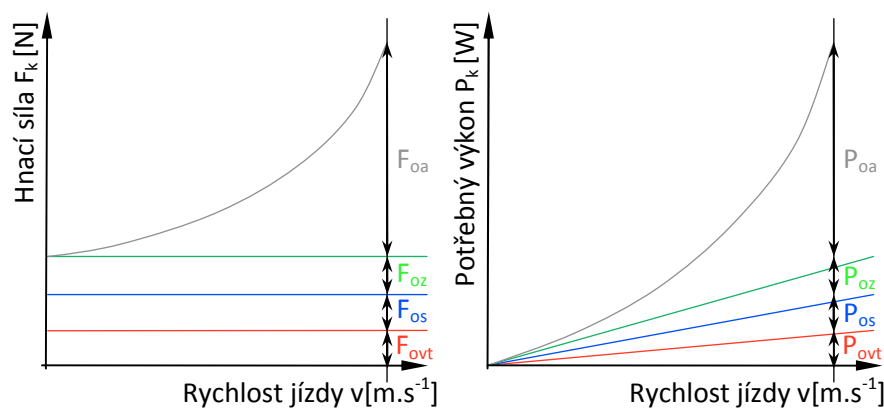
Přičemž  $\lambda$  je součinitel vlivu rotačních součástí. (18) (19) (20)

Ztrátový výkon daný odporem zrychlení je určen vztahem:

$$P_{oz} = F_{oz} v = \lambda mav \quad (\text{W; -, kg, ms}^{-2}, \text{ms}^{-1}) \quad [3.20]$$

### 2.1.5 Celkový jízdní odpor, potřebná hnací síla

Součtem všech jízdních odporů (odpor valivého tření –  $F_{ovt}$ , aerodynamický odpor –  $F_{oa}$ , odpor při jízdě vozidla do kopce –  $F_{os}$  a odpor zrychlení –  $F_{oz}$ ) získáme hodnotu celkového jízdního odporu vozidla. Obrázek 16 graficky vyjadřuje zastoupení těchto jízdních odporů.



Obrázek 16: Hnací síla a potřebný výkon pro překonání jízdních odporů

Potom pro celkový odpor vozidla platí:

$$F_o = F_{ovt} + F_{oa} + F_{os} + F_{oz} \quad (\text{N}; \text{N}, \text{N}, \text{N}, \text{N}) \quad [3.21]$$

Dosazením do rovnice [3.21] za jednotlivé jízdní odpory [3.7], [3.1], [3.5] a [3.19] dostáváme celkový odpor vozidla neboli potřebnou hnací sílu pro překonání těchto odporů:

$$F_h = F_o = G\xi \cos(\alpha) + \frac{\rho c_x A_x (v + v_0)^2}{2} \pm G \sin(\alpha) + \lambda m a \quad (\text{N}; \text{N}, -, \text{rad}, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, -, \text{m}^2, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{N}, \text{rad}, -, \text{kg}, \text{m} \cdot \text{s}^{-2}) \quad [3.22]$$

Za předpokladu jízdy po rovině ( $\alpha = 0 \rightarrow \sin(\alpha) = 0, \cos(\alpha) = 1$ ) bez zrychlení ( $a = 0$ ) působí na vozidlo pouze vzdušný a valivý odpor ( $F_{ovt} + F_{oa}$ ), přičemž pro vzdušný odpor předpokládáme bezvětří ( $v_0 = 0$ ). Celkový jízdní odpor potom bude:

$$F_o = G\xi + \frac{\rho c_x A_x v^2}{2} \quad (\text{N}; \text{N}, -, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, -, \text{m}^2, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad [3.23]$$

Hnací výkon vozidla neboli výkon, který musí být přiváděn na hnací kola k překonání jízdních odporů je:

$$P_k = F_o v = \frac{M_k v}{r_d} \quad (\text{W}; \text{Nm}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m}) \quad [3.24]$$

Dosadíme-li za celkový jízdní odpor  $F_o$  jednotlivé jízdní odpory, dostaneme:

$$P_k = (F_{ovt} + F_{oa} + F_{os} + F_{oz}) v \quad (\text{W}; \text{N}, \text{N}, \text{N}, \text{N}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad [3.25]$$

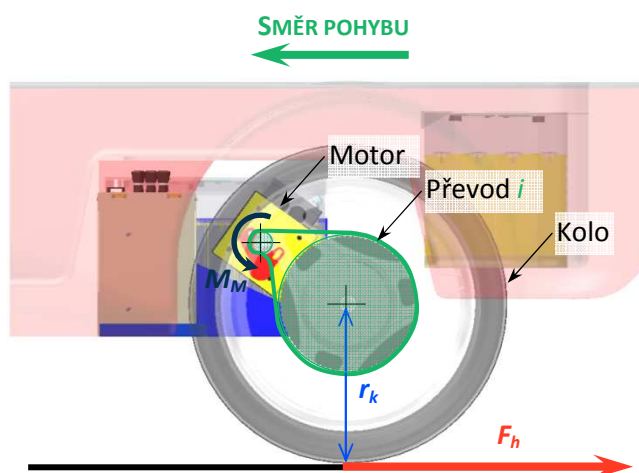
$$P_k = G \cos(\alpha) \xi v + \frac{v \rho c_x A_x (v + v_0)^2}{2} \pm G \sin(\alpha) v + \lambda m a v \quad (\text{W}; \text{N}, \text{rad}, -, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, -, \text{m}^2, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{N}, \text{rad}, -, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{kg}, \text{m} \cdot \text{s}^{-2}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad [3.26]$$

Za předpokladu jízdy po rovině a při konstantním zrychlení bude potom potřebný výkon:

$$P_k = G\xi v + \frac{\rho c_x A_x}{2} v^3 \quad (\text{W}; \text{N}, -, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, -, \text{m}^2, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad [3.27]$$

Z rovnice [3.27] vyplývá, že výkon potřebný k překonání valivého odporu, odporu stoupání a odporu zrychlení narůstá lineárně s rychlostí jízdy  $v$ . Výkon k překonání vzdušného odporu roste s třetí mocninou rychlosti  $v$ .

Definujme hnací sílu vozidla  $F_h$  (Obrázek 17) názorně na konkrétní aplikaci modelu tříkolového vozidla CityEL.



Obrázek 17: Silové poměry na hnacím kole vozidla CityEL

Moment na hřídeli kola definuje vztah [3.28].

$$M_k = F_h r_k, \quad (\text{Nm}; \text{N}, \text{m}), \quad [3.28]$$

kde  $r_k$  je poloměr kola a síla  $F_h$  je hnací síla dodaná motorem, redukována převodovkou s převodovým stupněm  $i$ .

Veličina  $M_M$  definuje moment síly hnacího motoru.

$$M_M = \frac{M_k}{i \cdot \eta} = \frac{F_h r_k}{i \cdot \eta} \Rightarrow F_h = \frac{i \cdot \eta}{r_k} M_M \quad (\text{N}; -, -, \text{m}, \text{Nm}) \quad [3.29]$$

Dosazením do rovnice [3.22] za sílu  $F_h$  [3.29], zjednodušeného výrazu [3.19], [3.1] a zrychlení v podélném směru  $a = \frac{dv}{dt}$  dostáváme:

$$F_h = \frac{i M_M}{r_k} = mg\xi + 0,625c_x A_x v^2 + \left( m + J \frac{i^2}{\eta r_k^2} \right) \frac{dv}{dt} \quad (\text{N}; \text{kg}, \text{m} \cdot \text{s}^{-2}, -, -, \text{m}^2, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{kg}, \text{kg} \cdot \text{m}^2, -, -, \text{m}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{s}) \quad [3.30]$$

Všechny konstanty rovnice jsou známy z měření, datových listů nebo z vlastností konstrukčních 3D CAD modelů. Nyní, po fyzikálním rozboru, můžeme sestavit simulační model dokazující vlastnosti chování vozidla. (18) (19) (20)

## 2.2 Modelování dynamických vlastností vozidla v prostředí MATLAB® SIMULINK®

Dynamika automobilu nebo motocyklu je jedním z klíčových ukazatelů jeho vlastnosti. Akcelerační časy jsou většinou pro konvenční automobily stanoveny při rozjezdu z nuly na 100 km.h<sup>-1</sup> nebo zrychlení z 50 km.h<sup>-1</sup> na 80 km.h<sup>-1</sup>. Pro elektromobily je zaveden standard akceleračních časů 0 – 30 km.h<sup>-1</sup> a 0 – 50 km.h<sup>-1</sup>. Dynamické chování vozidla je možné získat ze simulačních výsledků nebo testováním na reálném vozidle.

MATLAB®<sup>3</sup> je programové prostředí a skriptovací programovací jazyk pro vědeckotechnické numerické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, počítačové simulace, analýzu a prezentaci dat, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů. MATLAB® má vestavěnou celou řadu aplikačních knihoven, tzv. TOOLBOX, které si uživatel může dokupovat k jádru systému. V současnosti existuje několik desítek těchto knihoven, například knihovny pro zpracování signálů a obrazů, pro neuronové sítě, optimalizaci, parciální diferenciální rovnice, řízení, měření apod. jsou sdruženy to tzv. modulů.

Nástavbou MATLAB® je Simulink® – program pro simulaci a modelování dynamických systémů, který využívá algoritmy MATLAB® ve formě bloků<sup>4</sup> pro numerické řešení převážně nelineárních diferenciálních rovnic. Poskytuje uživateli možnost snadno a rychle vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových soustav a rovnic.

Tento světově uznávaný a rozšířený nástroj je použit pro simulaci chování pohonné jednotky vozidla a zdrojů energie. (22)

V rámci řešení problematiky modelování pohonné soustavy byly vytvořeny mnohé výpočtové a simulační bloky, které daly za vznik následujícím simulačním modelovým soustavám:

- Model kinematického a dynamického chování pohonné soustavy vozidla
- Mechatronický model pohonné soustavy vozidla
- Spolupráce dvou napájecích zdrojů pro pohonnou soustavu

---

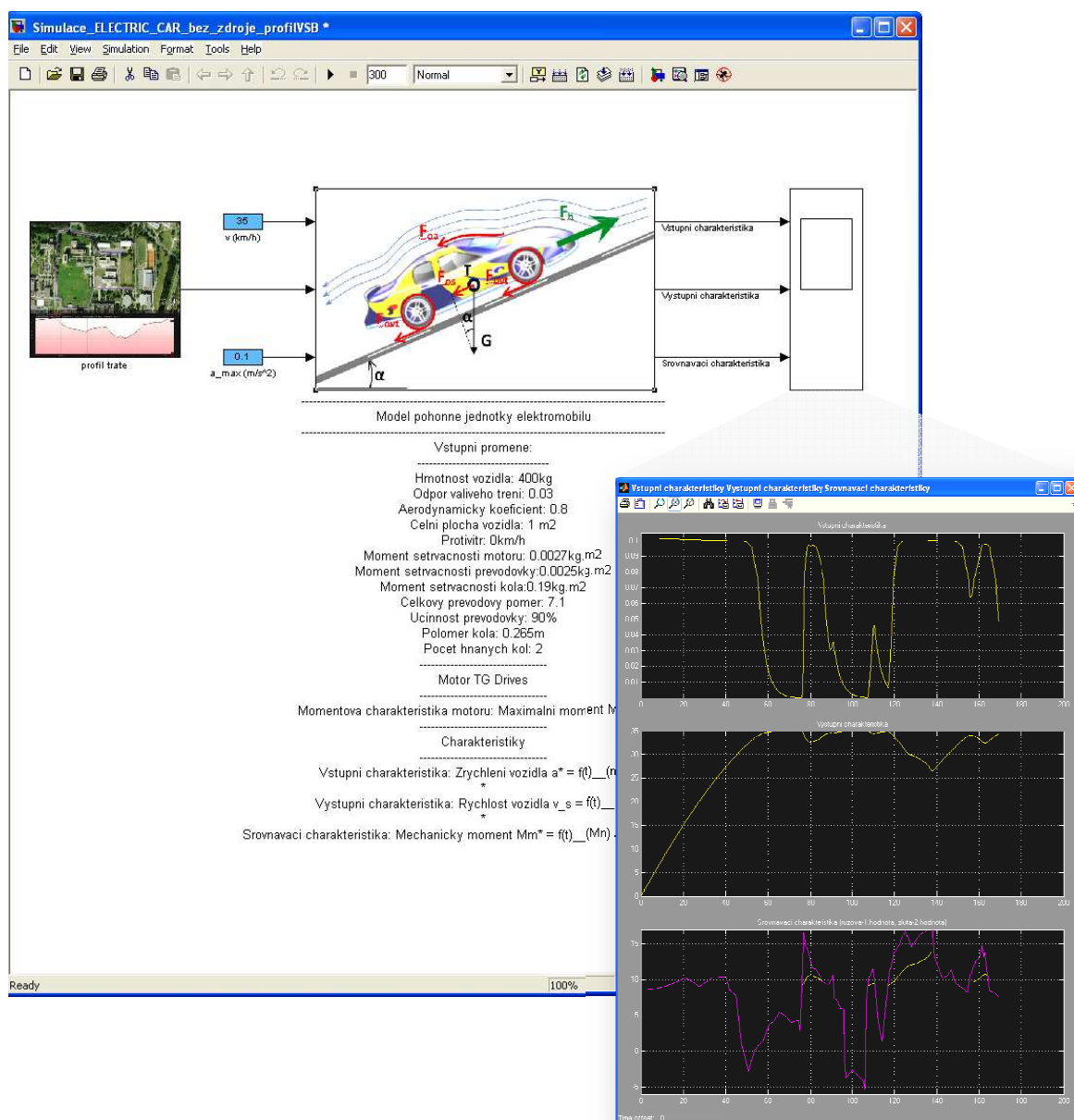
<sup>3</sup> MATLAB® (z anglického MATrix LABoratory) je software vyvinutý americkou společností The MathWorks®, Inc. v roce 1984. (22)

<sup>4</sup> Legenda simulačních ikon a bloků užitých při simulacích v této práci jsou uvedeny v přílohách v kapitole 6.



### 2.2.1 Model kinematického a dynamického chování pohonné soustavy vozidla

Modelová soustava (Obrázek 18) je výchozí soustavou popisující kinematické a dynamické chování vozidla. Skládá se z hlavního subsystému, do něhož vstupují žádaný signály rychlosti, maximálního zrychlení a blok realizující profil trati. Výstup bloku modelu soustavy tvoří tři časově závislé signály, jež jsou zobrazovány na třech grafech bloku *Scope*. Uživatel vyplněním tabulky vstupních konstant (Obrázek 19) a výběrem charakteristiky z roletového menu má možnost volit mezi vstupní, výstupní a komparační charakteristikou. Všechny zvolené konstanty, nastavené parametry a vybrané typy charakteristik může uživatel přehledně zkontrolovat výpisem pod hlavním blokem soustavy.



Obrázek 18: Simulační model pohonné soustavy

### 2.2.1.1 Zadávání parametrů modelu

Do výchozího bloku soustavy vstupují tři proměnné signály a řada konstant. Pro přehledné a názorné vkládání hodnot do systému je simulační model zamaskován a konstanty jsou zadávány do polí tabulky (Obrázek 19). První záložka *Vstupní proměnné* obsahuje konstanty popisující fyzikální vlastnosti vozidla, jeho motoru, převodovky a rozvodovky. Následující záložka *Motor* určuje výběrem z roletového menu parametry mechanické charakteristiky použitého motoru (pro

Function Block Parameters: Model pohonne jednotky elektrom...

Model pohonne jednotky elektromobilu (mask)

Model se sestava ze tri zakladnich bloku:

- Blok zadavani vstupnich promennych - parametry vozidla a pohonneho ustroji, pozadavky na rychlost vozidla a reliefu drahy
- Blok omezeni pozadovaneho momentu - pozadovany moment je omezen dle momentove charakteristiky uziteho motoru
- Blok dynamiky vozidla - vypocet skutecných hodnot promennych

(Model je prizpusoben pro trikolove vozidlo na Katedre elektroniky VSB-TU Ostrava osazene SMPM motorem TG Drives T4-0530-30-48)

Vstupni promene Motor Charakteristiky

Hmotnost vozidla (kg)

350

Konstanta valiveho treni (-)

0.03

Aerodynamicky koeficient  $c_x$  (-)

0.8

Celni plocha vozidla ( $m^2$ )

1

Protivitr (km/h)

0

Vzdalenost stoupání (m)

100

Moment setrvacnosti motoru (kg.m2)

0.0027

Moment setrvacnosti kola (kg.m2)

0.19

Moment setrvacnosti prevodovky (kg.m2)

0.0025

Celkovy prevodovy pomer (-)

7.1

Ucininnost prevodovky (%)

98

Polomer kola (m)

0.265

Pocet hnanych kol (-)

2

Volba momentorve charakteristiky motoru

- Maximalni moment  $M_{max}=f(n)$
- Jmenovity moment  $M_n=f(n)$
- Maximalni moment  $M_{max}=f(n)$

Charakteristiky

- Vstupni charakteristiky pohonu Pozadovany vykon  $P^*=f(t)$
- Vystupni charakteristiky pohonu Vykon motoru  $P_{m_s}=f(t)$
- Srovnavaci charakteristiky pohonu Rychlost vozidla  $v^*=f(t) / v_s=f(t)$

OK Cancel Help Apply

Obrázek 19: Zadávací panel konstant simulačního modelu pohonné soustavy

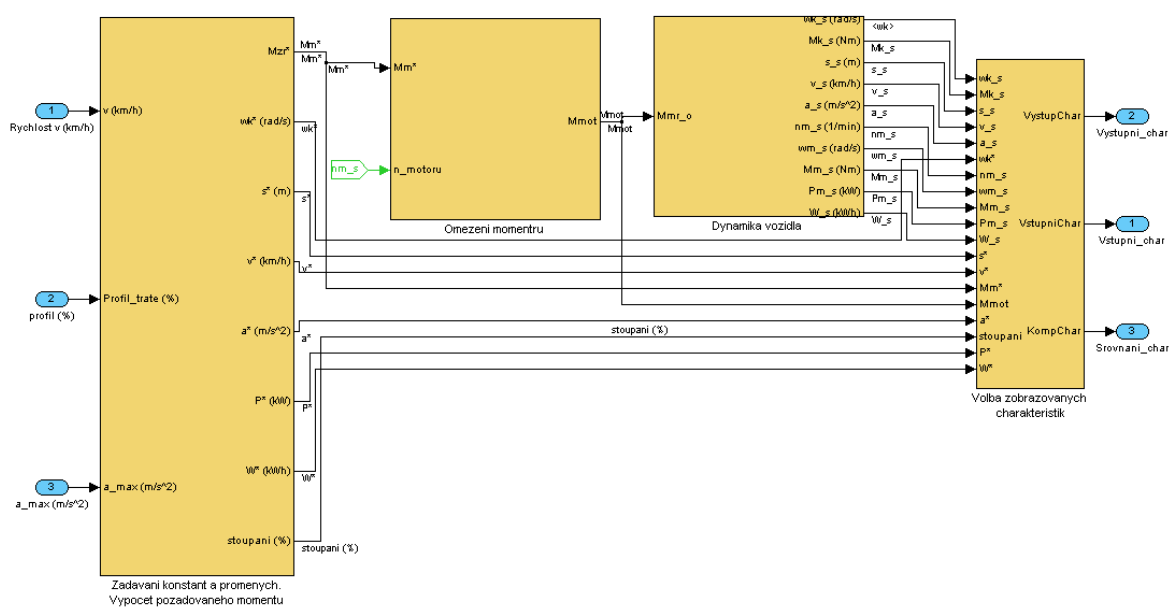
tento konkrétní případ motor TG Drives typ T4-0530-30-48, viz charakteristika Obrázek 59). Poslední záložkou *Charakteristiky* vybíráme typ zobrazené charakteristiky: *Vstupní charakteristiky*

*pohonu* – úhlová rychlost kola, dráha, rychlost a zrychlení vozidla, požadovaný a omezený mechanický moment motoru, požadovaný výkon a energie a stoupání vozovky; *Výstupní charakteristiky pohonu* - úhlová rychlost kola, mechanický moment kola, dráha, rychlost a zrychlení vozidla, otáčky a úhlová rychlost motoru, mechanický moment motoru, výkon a energie. Poslední volba charakteristik slouží k porovnávání (komparování) dvojce vstupních a výstupních charakteristik – úhlová rychlost, dráha, rychlost a zrychlení vozidla, moment motoru výkon a energie a třech charakteristik porovnávající vzájemné výstupní veličiny. Všechny výše uvedené nastavené konstanty a parametry jsou po kliknutí na tlačítko *OK* nebo *Apply* uvedeny výpisem pod blokem soustavy (Obrázek 18).

### 2.2.1.2 Vnitřní struktura modelu

Kliknutím pravým tlačítkem myši na blok se symbolem auta, který reprezentuje hlavní blok modelové soustavy, a výběrem možnosti *Look Under Mask* se dostáváme do vnitřní struktury bloku (Obrázek 20). Vnitřní struktura modelu soustavy se skládá ze čtyř objektů - podsestav.

- Výpočet odporových sil a požadovaného momentu
- Omezení momentu
- Dynamika vozidla
- Volba zobrazovaných charakteristik



Obrázek 20: Vnitřní struktura modelu pohonné jednotky



#### 2.2.1.4 Omezení momentu dle motoru

Obrázek 23: Blok omezení momentu

#### 2.2.1.5 Blok dynamiky vozidla

[illegible]

Obrázek 25: Vnitřní struktura bloku dynamiky vozidla

37

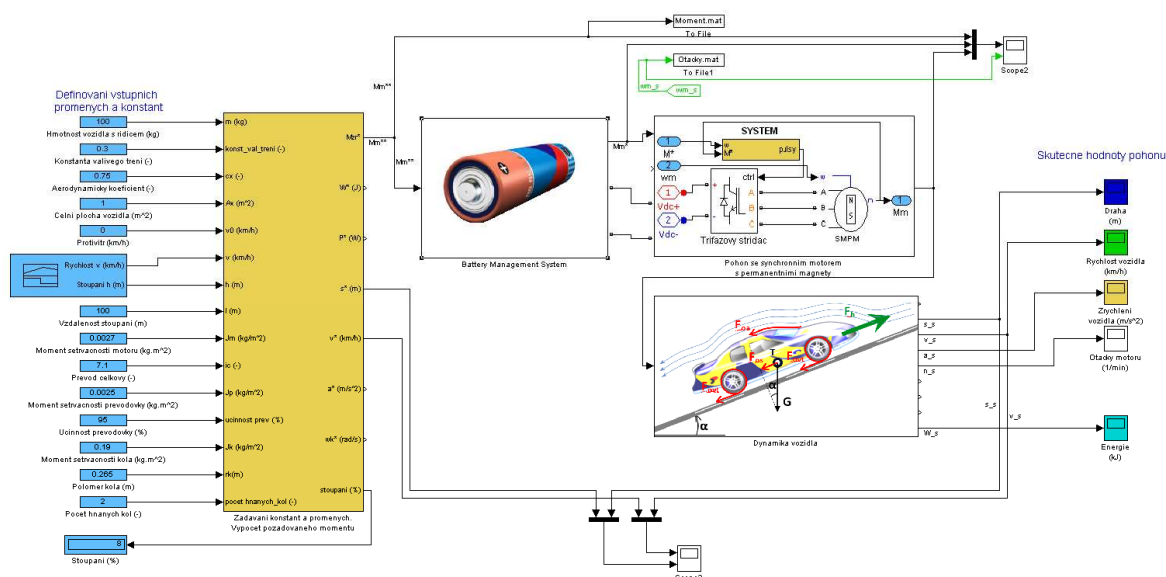
následně vypočítán skutečný moment motoru. Poté, jelikož je již znám moment motoru a úhlová rychlost kola, již není problém odvodit výkon, energii, úhlovou rychlost motoru a otáčky motoru. Tím jsou určeny všechny skutečné hodnoty pohonu.

### 2.2.1.6 Volba zobrazovaných charakteristik

Blok sdružuje všechny vstupní a výstupní signály a za pomoci signálového demultiplexoru, jenž je indexován uživatelem z volby roletového menu (viz kapitola 2.2.1.1), který vybírá požadovaná zobrazovaná data (závislosti).

### 2.2.2 Mechatronický model pohonné soustavy vozidla

Model (Obrázek 26) vychází z hlavních bloků soustavy z předchozí kapitoly 2.2.1. Taktéž funkce je obdobná, avšak navíc jsou respektovány parametry reálného zdroje energie (akumulátorová baterie), akčního členu (výkonového měniče) a motoru (SMPM). Zadávání hodnot proměnných a konstant je prováděno přímým vkládáním do polí *Constant* (světle modrých) a

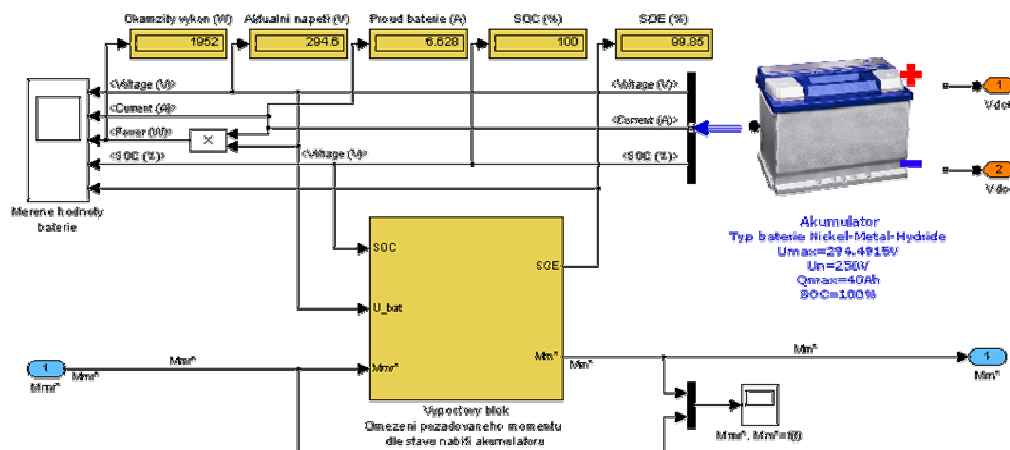


Obrázek 26: Mechatronický model pohonné soustavy vozidla

nadefinováním průběhu rychlosti a jízdního profilu v bloku *Signal Builder*. Vstupní blok (*výpočet sil a požadovaného momentu*) a výstupní (*dynamika vozidla*) blok zůstávají nezměněny, jak již byly popsány v předchozích kapitolách 2.2.1.3 a 2.2.1.5. V následujících kapitolách se zaměříme na dva nové bloky popisující chování akumulátorové baterie a pohonu s SMPM.

#### 2.2.2.1 Blok bateriového managementu systému – BMS

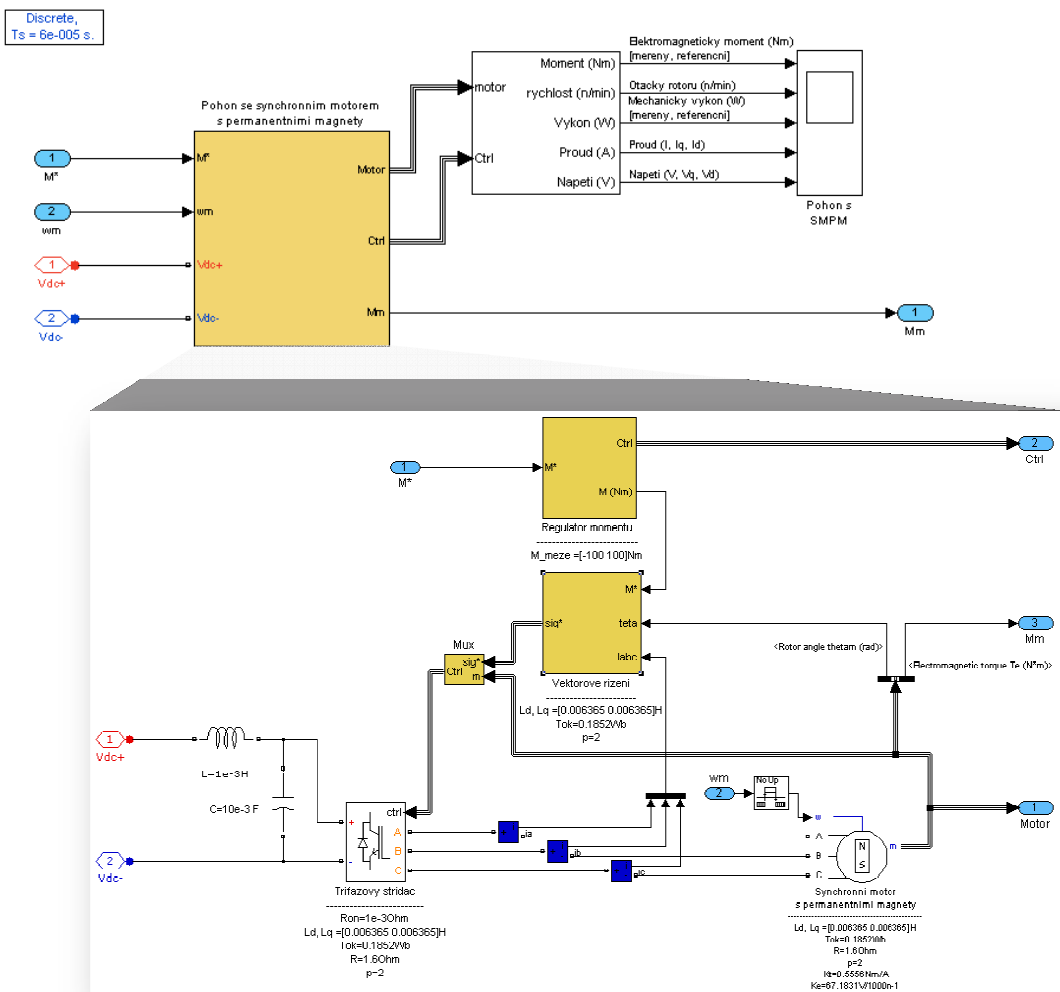
Následující blok (Obrázek 27) charakterizuje chování napájecího zdroje (akumulátorové baterie) pohonné soustavy a jeho vliv na výkon, respektive moment motoru. Nasimulovaná situace řeší stav, kdy s vybíjejícím se akumulátorem klesá jeho stav nabití (SOC), respektive stav energie (SOE) a akumulátor již není schopen dodat žádanou hodnotu proudu a dochází tak k omezení žádaného momentu.



Obrázek 27: Blok bateriového managementu

### 2.2.2.2 Blok pohonu s vektorově řízeným střídačem s SMPM

Simulační model realizující třífázový napěťový střídač s vektorovým řízením a synchronním motorem s permanentními magnety. Model je odvozen z modelu *AC6 - 100 kW Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive* z Matlab® knihovny SimPowerSystems. Model (Obrázek 28) byl upraven, počesťen a začleněn do struktury pohonné soustavy.



Obrázek 28: Blok vektorově řízeného střídače s SMPM

Skládá se z bloku *Regulator momentu* – nastavení mezních hodnot momentu, bloku *Vektorového řízení* – nastavení veličin dle parametrů motoru, *Synchronní motor s permanentními magnety* – výběr parametrů z předdefinovaných typů motorů nebo výpis hodnot dle datového listu a z bloku *Trifazový střídač*. Z testování modelu v soustavě se ukázalo nutné doplnit na vstup stejnosměrné strany střídače o filtrační kondenzátor  $C = 10 \text{ mF}$  a indukčnost  $1 \text{ mH}$ . Vstupní terminály jsou dvojího druhu: elektrického typu - stejnosměrné napájecí napětí  $V_{dc+}$ ,  $V_{dc-}$  a signálového typu - žádaný moment  $M^*$  a vypočtená hodnota (z bloku *Dynamika vozidla*, *Obrázek 26*) otáček motoru  $\omega_m$ . Výstupními signály z bloku jsou mechanický moment motoru  $M_m$  (dále vstupuje do bloku *Dynamika vozidla*) a výstupy zobrazující měřené veličiny motoru a pohonu.

### 2.2.3 Spolupráce dvou napájecích zdrojů

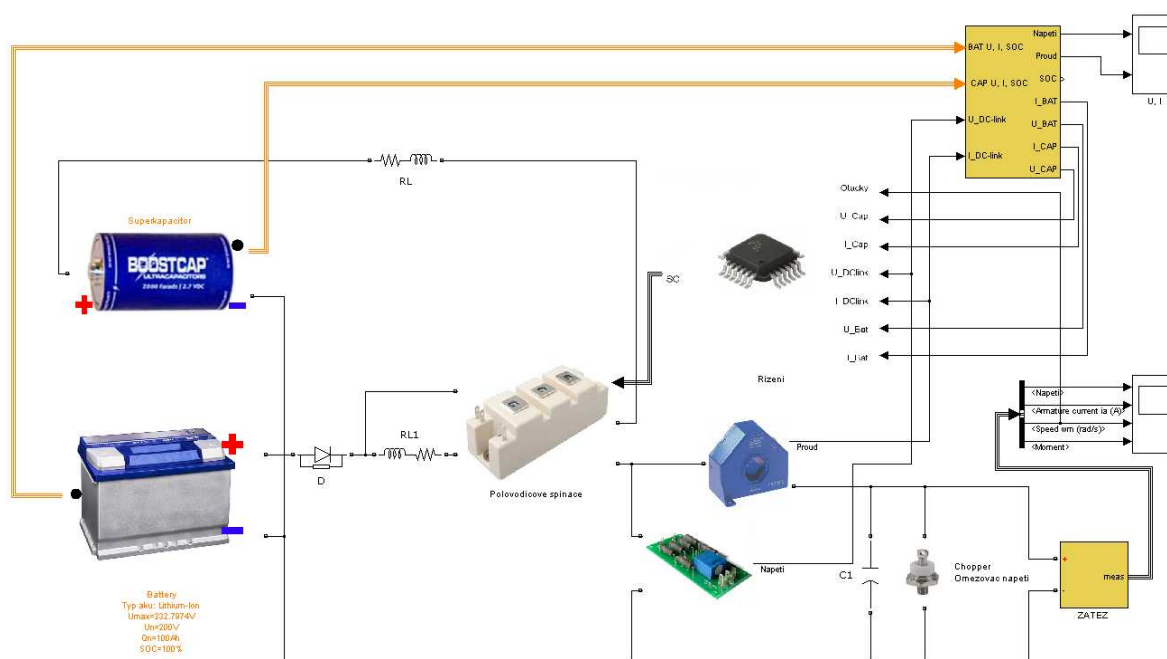
Modelová sestava simuluje vzájemnou spolupráci dvou napájecích zdrojů - akumulátoru a ultrakapacitoru pracujícího do společné zátěže. Základní předpoklady a podmínky jejich spolupráce jsou následující:

- akumulátor je primárním zdrojem dodávající dlouhodobý kladný výkon
- ultrakapacitor je sekundárním, pomocným zdrojem soustavy
- akumulátor nepřijímá zpětnou, rekuperovanou energii
- ultrakapacitor dokáže rychle pojmout nebo vydat energii

Vzájemnou spolupráci vícezdrojových napájecích jednotek můžeme z hlediska jejich správy energetického managementu rozdělit do vícera úrovní vyspělosti.

#### 2.2.3.1 Energetický management nulté úrovně

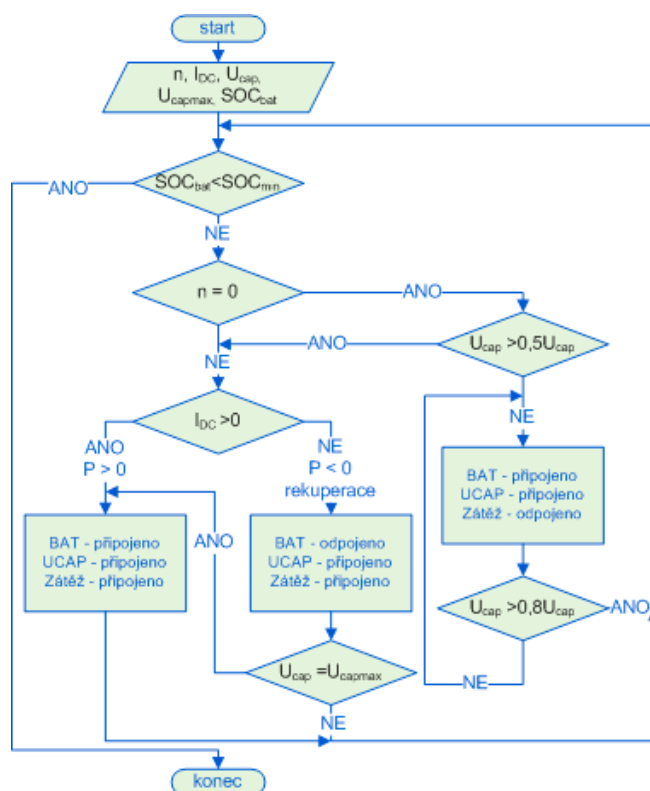
Energetický management nulté úrovně je ideovým příkladem spolupráce dvou napájecích zdrojů. *Obrázek 29* simulačně popisuje tento energetický systém. Skládá se ze dvou napájecích



*Obrázek 29: Simulační model vícezdrojové jednotky s energetickým managementem nulté úrovně*



zdrojů (akumulátorové a ultrakapacitorové baterie) pracující paralelně k zátěži, která je reprezentována stejnosměrným motorem s permanentními magnety. Volba energetického zdroje a vzájemná distribuce energií je prováděna spínáním ideálních spínačů v bloku *Polovodické spinace*, který je řízen subsystémem *Rizeni*, do nějž jsou svedena měřená napětí, proudy a stavy nabití jednotlivých zdrojů a dále napětí, proud a otáčky popisující chování zátěže. Omezení proudových strmostí a napěťových překmitů při spínání ideálních spínačů je kompenzováno RL filtračními členy.



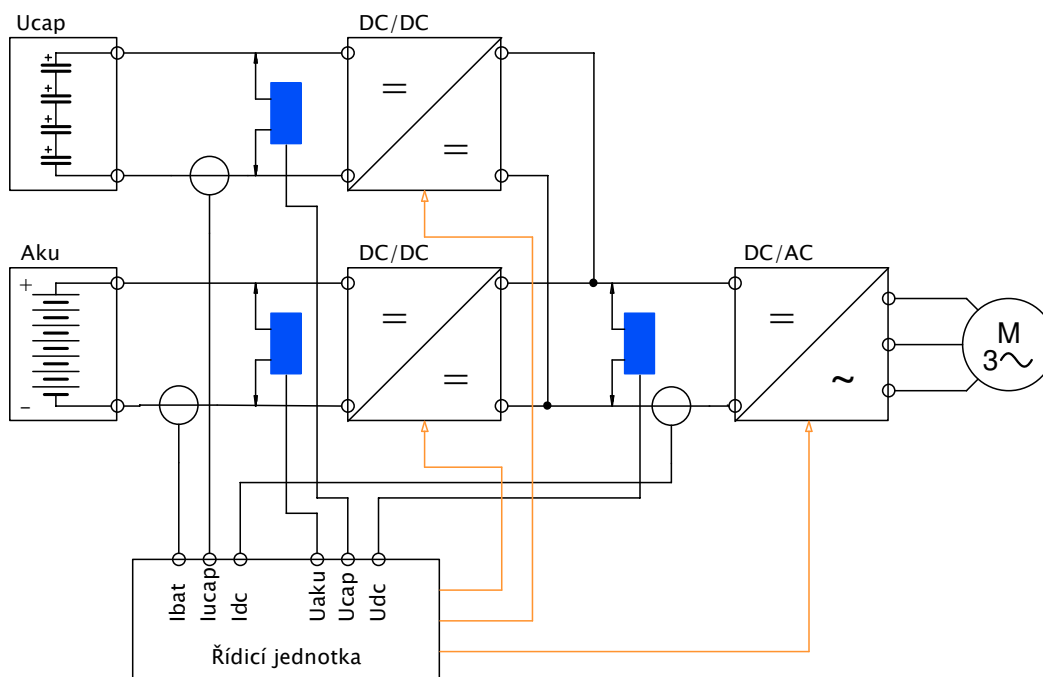
Obrázek 30: Vývojový diagram energetického managementu nulté úrovně

Řízení systému je rozfázováno do třech stavů: přednabití ultrakapacitorové baterie, provozní stav a rekuperace. Vývojový diagram (Obrázek 30) popisuje posloupnost kroků řídicího bloku. Na začátku algoritmu jsou načteny hodnoty proměnných  $n$  - otáčky motoru,  $I_{DC}$  - proud tekoucí mezi zdrojem a zátěží,  $U_{cap}$  - aktuální napětí na ultrakapacitorové baterii,  $SOC_{bat}$  - stav nabití akumulátorové baterie a maximální a minimální hodnoty napětí baterie a ultrakapacitoru. Následuje rozhodovací krok, zdali stav baterie není nižší, než je povolená minimální hodnota SOC a pokud ano, je program ukončen a jednotka zablokuje pohon s hlášením o nutnosti nabití akumulátorové baterie. V případě, že je vše v pořádku, algoritmus se táže, zdali se vozidlo pohybuje, či nikoli. Pokud  $n = 0$ , tj. vozidlo stojí, je kontrolován stav napětí na ultrakapacitorové baterii, jelikož se předpokládá, že vozidlo bude akcelarovat a bude zapotřebí obou zdrojů energie. Jeli napětí nižší, než dovolené je odpojena zátěž a přes nabíjecí odporově-induktivní obvod je ultrakapacitor nabíjen z akumulátorové baterie až na hodnotu 80-100%. Tento stav je adaptivně volen dle aktuálního stavu vybití akumulátoru a to z důvodu nastane-li stav okamžité rekuperace (rozjezd z kopce). Pokud se vozidlo pohybuje, otáčky jsou nenulové, je snímán proud  $I_{DC}$  tekoucí

do/z zátěže a vyhodnocován směr výkonu. Je-li záporný, tj. nastává stav rekuperace, akumulátorový článek je odpojen a energie je vracena do ultrakapacitoru. V případě, kdy hodnota napětí naroste na mez maximálního napětí kondenzátoru, je energie převedena do připojeného akumulátoru. Jako záložní bezpečnostní obvod je na výstupní svorky připojen blok omezovače napětí, tzv. chopper, který při překročení maximálního napětí maří energii na připojeném odporu. Poslední fází je běžný provozní stav, kdy se vozidlo pohybuje ( $n > 0 \wedge I_{DC} > 0$ ) a do zátěže teče proud z obou zdrojů energie.

### 2.2.3.2 Energetický management vyšší úrovně

Energetický management vyšší úrovně (Obrázek 31) již nepracuje s ideálními „ventily“, které přepouštějí energii mezi zdroji a zátěží, jako v předchozím modelovaném případě, ale již každý zdroj má přizpůsobovací DC/DC měnič. Přizpůsobovací měniče jsou řízeny tak, aby regulovaly napěťové hladiny jednotlivých zdrojů a řídily přenášené proudy. Vlastní řízení celé soustavy obstarává nadřazený řídicí systém, který v závislosti na požadavcích pohonné soustavy vozidla vyhodnocuje optimální řízení z hlediska maximální účinnosti celé soustavy.



Obrázek 31: Blokové schéma vícezdrojové jednotky vyšší úrovně

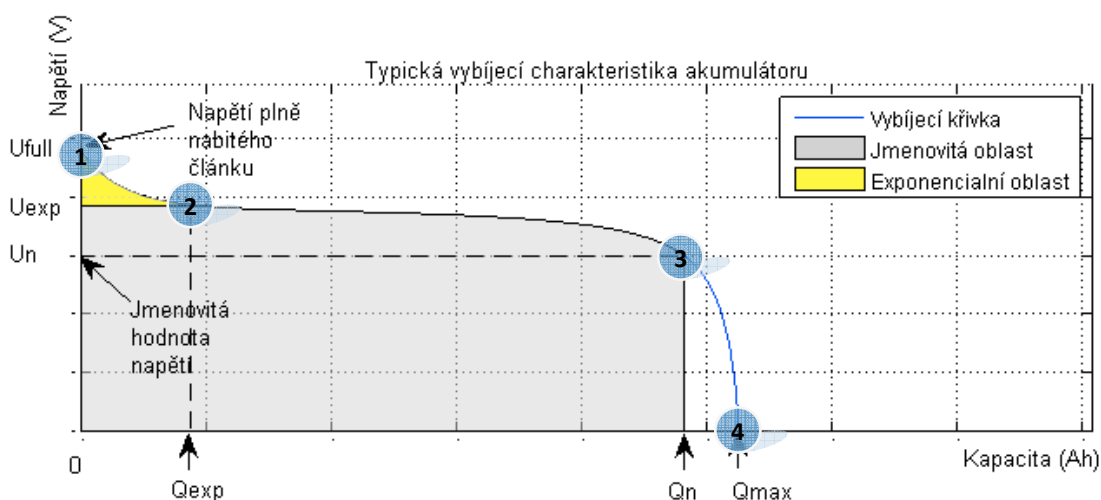
## 2.3 Modelování vlastností zdrojů v prostředí MATLAB® SIMULINK®

### 2.3.1 Model akumulátorové baterie

Baterie v hybridních vozidlech, elektromobilech nebo jiných elektrických zařízeních hrají velmi významnou roli. Tento článek systému dokáže pojmout velké množství energie a vydat ji, jakmile je potřeba. Baterie umožňují regenerační brzdění elektromobilů a doplňují napájecí zdroje s malou dynamikou, jako je vodíkový článek. Konstruktor elektromobilu nebo hybridního vozidla musí velmi dobře znát chování celého pohonného systému a také detailně simulační modely zdrojů. Proto je velmi důležité, aby tento model co nejvěrněji imitoval reálné vlastnosti baterie. Je mnoho typů akumulátorů, které jsou více, či méně vhodné pro využití ve vozidlech. Baterie mají mnohé parametry ovlivňující jejich výkon. K určení výkonu baterie existuje řada matematických modelů, které však nepokryjí všechny činitele ovlivňující její chování.

Nejjednodušší matematický model obsahuje ideální napěťový zdroj v sérii s rezistorem reprezentující vnitřní odpor baterie. Avšak tento jednoduchý model nebere v potaz stav vybití (nabití) baterie, tzv. SOC – State Of Charge. Jiný model založený na zdroji reprezentující svorkové napětí v sérii s vnitřním odporem a paralelním RC obvodem, nazývaným Warburg impedance. Určení parametrů obvodu je prováděno komplikovanou technikou nazývanou impedanční spektroskopie. Nejlepším, známým modelem je tzv. Shepherd model. Tento model je nejčastěji používaným modelem popisující elektrochemické vlastnosti akumulátoru na základě svorkového napětí, napětí naprázdno, vnitřního odporu, vybíjecího odporu a stavu nabití akumulátoru (SOC) a je jej možné použít jak pro vybíjení, tak pro nabíjení. Modifikovaný Shepherd model využívá pouze SOC a stavové proměnné reprezentující napěťové chování baterie. Toto platí v ustáleném stavu (konstantním) proudu a při prudkých změnách dochází k jisté chybě simulačního modelu.

Simulačních modelů akumulátorových článků existuje velké množství, a proto se budeme konkrétněji dále zabývat právě modifikovaným Shepherd modelem, z něhož vychází i model akumulátoru knihovny SimPowerSystems v prostředí Matlab® Simulink®. (23) (24)



Obrázek 32: Typická vybíjecí křivka a významné body charakteristiky (24)

### 2.3.1.1 Model akumulátoru – vybíjení

Typickou vybíjecí křivku akumulátoru NiMH znázorňuje obrázek 32, který můžeme rozdělit do tří oblastí. První část (Obrázek 32 barva žlutá) reprezentuje exponenciální úbytek napětí, při nabití baterii. V závislosti na typu baterie je tato oblast širší nebo užší. Druhá oblast (na Obrázek 32 barva šedá) reprezentuje náboj, který může být čerpán z baterie, dokud napětí nepoklesne pod jmenovitou hodnotu napětí. Poslední část reprezentuje úplné vybití baterie, kdy napětí již klesá strmě.

Model baterie vychází ze zjednodušeného Shepherd modelu a přesně reprezentuje napěťovou dynamiku při měnícím se proudu a bere v úvahu napětí naprázdno, jako funkci SOC. Napětí baterie je definuje výraz [3.31].

$$U_{batt} = U_0 - K \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i_t - R \cdot i + A e^{-B \cdot i_t} - K \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i^* \quad (V; V, VA^{-1}h^{-1}, Ah, Ah, Ah, Ah, \Omega, A, V, Ah^{-1} VA^{-1}h^{-1}, Ah, Ah, Ah, A) \quad [3.31]$$

Kde  $U_{batt}$  ..... napětí baterie (V)

$U_0$  ..... konstantní napětí baterie (V)

$K$  ..... polarizační konstanta ( $V A^{-1}h^{-1}$ ) nebo polarizační rezistence ( $\Omega$ )

$Q$  ..... kapacita baterie (Ah)

$i_t = \int i dt$  ..... aktuální kapacita baterie (Ah)

$A$  ..... amplituda exponenciální zóny (V)

$B$  ..... inverzní časová konstanta exponenciální zóny ( $A^{-1}h^{-1}$ )

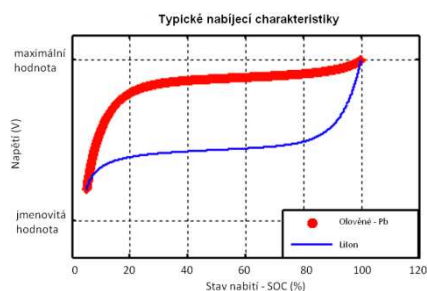
$i$  ..... proud baterie (A)

$i^*$  ..... filtrovaný proud (A) – odstraňuje chybu Shepherd modelu při prudkých změnách proudu baterie. (25)

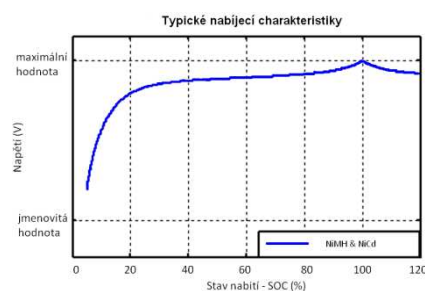
Kompletní simulační model nabíjení baterie popisuje obrázek 35. Řídicí signál do bloku ovládaného napěťového zdroje  $U_{batt}$  je definován rovnicí [3.31].

### 2.3.1.2 Model akumulátoru – nabíjení

Chování akumulátorů při nabíjení popisují charakteristiky konce nabíjení (EOC – End Of Charge) a jsou rozdílné pro jednotlivé typy akumulátorů.

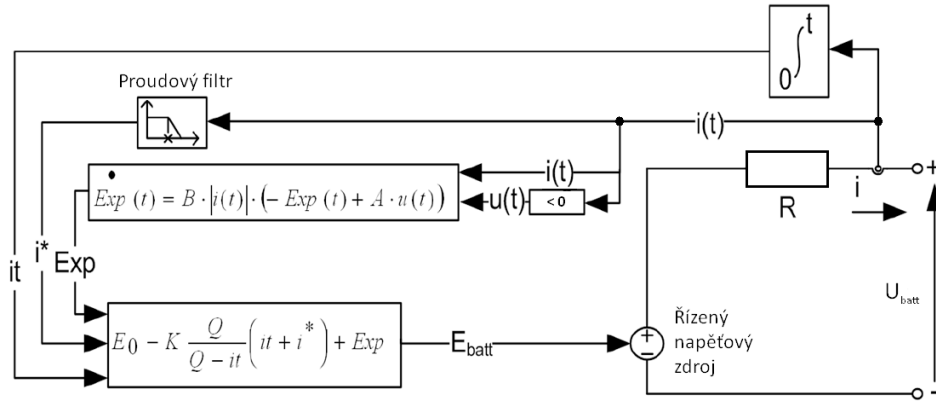


Obrázek 33: Nabíjecí charakteristiky olověného a Li-Ion akumulátoru (23)



Obrázek 34: Nabíjecí charakteristiky NiMH a NiCd akumulátoru (23)

Například olověné baterie a Li-Ion baterie mají stejnou EOC charakteristiku (Obrázek 33), jelikož u nich napětí rapidně stoupne, jsou-li plně nabity. Kdežto chování akumulátorů NiMH a NiCd je jiné. Jsou-li plně nabity, začne napětí pomalu klesat v závislosti na velikosti amplitudy proudu (Obrázek 34). Tento jev je velmi důležitý, jak pro simulační model, tak například při řízení inteligentních



Obrázek 35: Blokové schéma simulačního modelu baterie (23)

nabíječek, kdy je během nabíjení monitorován pokles napětí  $\Delta U$  a v případě vyhodnocení okamžitě zastaven nabíjecí proces.

Kompletní simulační model vybíjení baterie popisuje obrázek 35. Řídicí signál bloku řízeného napěťového zdroje  $U_{batt}$  závisí na druhu použitého akumulátoru a jsou dány vztahy [3.32], [3.33] a [3.34]. (24)

Olověný akumulátor:

$$U_{batt} = U_0 - K \frac{Q}{i_t - 0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i_t + e^t$$

(V; V, VA<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>, Ah, Ah, Ah, Ah, VA<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>, Ah, Ah, Ah, s)

[3.32]

Li-Ion akumulátor:

$$U_{batt} = U_0 - K \frac{Q}{i_t - 0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i_t + A e^{-B i_t}$$

(V; V, VA<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>, Ah, Ah, Ah, Ah, VA<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>, Ah, Ah, Ah, V, A<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>, Ah)

[3.33]

NiMH a NiCd akumulátor:

$$U_{batt} = U_0 - K \frac{Q}{|i_t| - 0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i_t + e^t$$

(V; V, VA<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>, Ah, Ah, Ah, Ah, VA<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>, Ah, Ah, Ah, s)

[3.34]

### 2.3.1.3 Předpoklady a limity modelu

- Předpoklad konstantní velikosti vnitřního odporu při nabíjení nebo vybíjení a nezávislost na velikosti amplitudy proudu.

- Parametry modelu jsou odvozeny z vybíjecí charakteristiky a předpokládají se totožné vlastnosti pro nabíjení.
- Kapacita baterie se nemění s amplitudou proudu.
- Změna teploty nemá vliv na chování baterie.
- Není uvažováno samovybíjení baterie.
- Není brán v úvahu paměťový efekt baterie.
- Minimální napětí baterie naprázdno je 0V a maximální napětí je  $2xU_0$ .
- Minimální kapacita baterie je 0Ah a maximální hodnota je Q, tedy hodnota stavu nabití baterie (SOC) nemůže dosahovat vyšší hodnoty než 100%, i když je baterie přebíjena. (23)

#### 2.3.1.4 Popis modelu Battery z Matlab® Simulink® SimPowerSystems

V simulaci pohonné soustavy byl využit modifikovaný model akumulátoru (Obrázek 36) z knihovny SimPowerSystems. Vychází z blokového diagramu (Obrázek 35) simulačního modelu baterie.



Obrázek 36: Simulační model akumulátoru

Blok obsahuje tři přípojný terminály:

- + Kladný pól baterie
- Záporný pól baterie

*m* Měřicí výstup. Tento výstup je vektor sdružující tři signály:

*SOC (%)* Informace o stavu nabití baterie. Její hodnota se pohybuje od 100% pro plně nabitou baterii do hodnoty 0%, kdy je baterie vybitá. SOC je vypočítáváno dle vztahu [3.35].

$$SOC = 100 \left( 1 - \frac{\int_0^t i dt}{Q} \right) \quad [3.35]$$

(% , -, Ah, V)

*Current (A)* Informace o aktuální hodnotě proudu

*Voltage (V)* Informace o aktuální hodnotě napětí

Jmenovitá energie baterie je dána vztahem

$$W_{batWh} = n \cdot W_{\text{článku}} = n \cdot (C_{bat} \cdot U_{\text{článku}}) \quad (Wh; -, Ah, V), \quad [3.36]$$

kde  $n$  je počet článků baterie,  $C_{bat}$  kapacita článku v Ah a  $U_{\text{článku}}$  je napětí jednoho článku.

### 2.3.1.5 Konfigurace parametrů bloku Akumulator

Dvojitým kliknutím na ikonu bloku *Akumulator* se zobrazí okno vlastnosti, jenž má parametry bloku rozčleněny do tří kategorií. První záložka *Parametry* (Obrázek 37) obsahuje následující položky:

- *Typ baterie* – výběr z předdefinovaných akumulátorů typu olovené, Lilon, NiCd a NiMH.
- *Jmenovité napětí (V)* – nominální hodnota napětí akumulátoru.
- *Jmenovitá kapacita (Ah)* – nominální hodnota kapacity akumulátoru.
- *Počáteční stav nabití (%)* – počáteční nastavení úrovně nabití akumulátoru v rozmezí od 100% pro plně nabitý akumulátor po stav vybití definovaný 0%.

Tyto čtyři parametry určují vlastnosti obecného článku daného typu. Pro přesné definování parametrů dle vybíjecích charakteristik je nutné odškrtnout položku „Užít parametry podle typu baterie a nominálních hodnot“.

- *Maximální kapacita (Ah)* – maximální teoretická kapacita, která je vypočtena jako 105% jmenovité kapacity. (Obrázek 32, bod 4)
- *Napětí plně nabitého článku (V)* – hodnoty daná dle vybíjecí charakteristiky. Nejedná se o napětí akumulátoru naprázdno. (Obrázek 32, bod 1)
- *Jmenovitý vybíjecí proud* – hodnota proudu, pro kterou je vykreslována vybíjecí charakteristika. Typická hodnota pro NiMH je 0,2C. Tato hodnota je udávána výrobcem.
- *Vnitřní odpor akumulátoru ( $\Omega$ )* – hodnota vnitřního odporu u modelu akumulátoru se nemění při nabíjení nebo vybíjení a je nezávislá na amplitudě proudu.
- *Kapacita při jmenovitém napětí (Ah)* – tato hodnota se pohybuje mezi hodnotami  $Q_{exp}$  a  $Q_{max}$ . (Obrázek 32, bod 3)
- *Exponenciální zóna [Napětí(V), Kapacita (Ah)]* – určení exponenciální oblasti na vybíjecí křivce akumulátoru. (Obrázek 32, bod 2)

Block Parameters: Akumulator

Akumulator (mask)

Simulační model akumulátoru: olovene, Li-Ion, Ni-Cd, Ni-MH.  
Odznamením "Užit parametry podle typu baterie a nominalních hodnot" je možné definovat parametry podle vybíjecích charakteristik akumulátoru.

Parametry    Zobrazení vybíjecích charakteristik    Dynamika akumulátoru

Typ baterie: Nickel-Metal-Hydrate

Jmenovité napeti (V): 200

Jmenovitá kapacita (Ah): 100

Pocatecni stav nabití SOC (%): 100

☒ Užit parametry podle typu baterie a nominalních hodnot

Maximalni kapacita (Ah): 107.6923

Napeti plne nabitého článku (V): 235.5932

Jmenovity vybíjecí proud (A): 20

Vnitřní odpor akumulátoru (Ohms): 0.02

Kapacita (Ah) při jmenovitem napeti: 96.1538

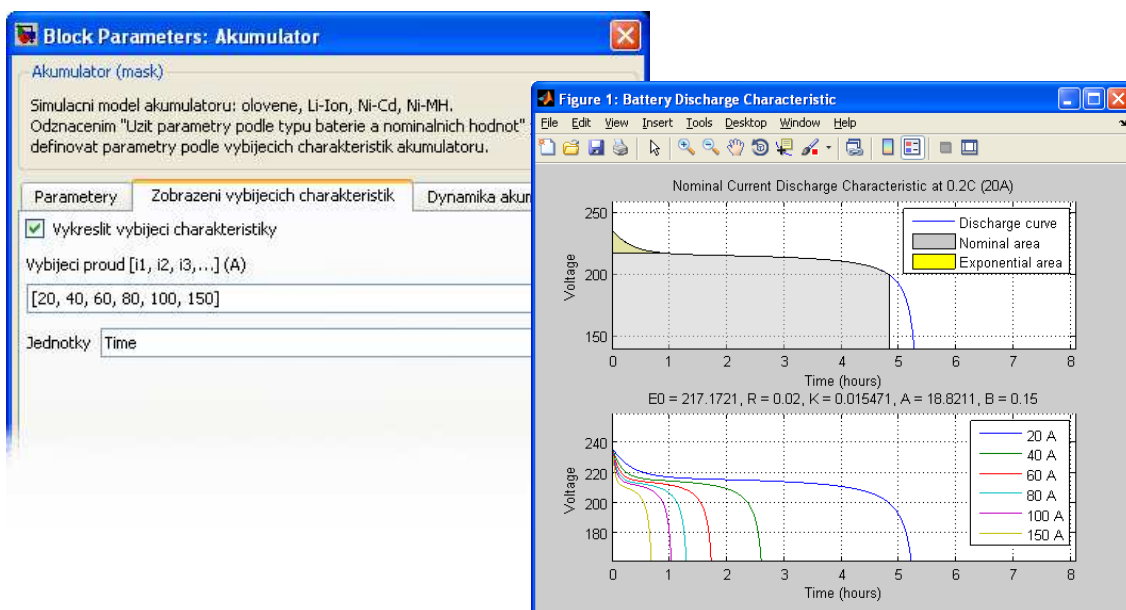
Exponencialni zóna [Napeti (V), Kapacita (Ah)]: [216.9492 20]

OK    Cancel    Help    Apply

Obrázek 37: Vlastnosti akumulátoru - záložka parametry

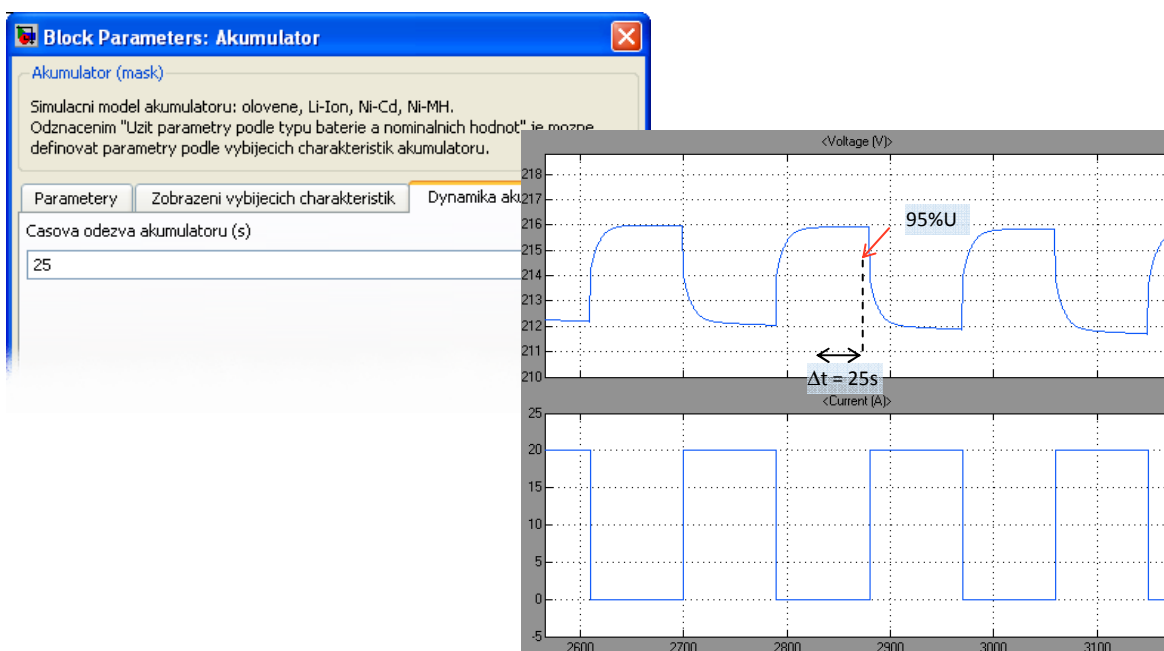
Další záložka *Zobrazení vybíjecích charakteristik* slouží k zobrazení nadefinovaných vlastností akumulátoru.

- *Vykreslit vybíjecí charakteristiky* – zaškrtnutím této položky a kliknutím na tlačítko *Apply* se zobrazí okno se dvěma grafy (Obrázek 38). Vrchní graf zobrazuje vybíjecí charakteristiku při jmenovitém vybíjecím proudu, dolní graf charakteristiky dle předdefinovaných proudů v položce *Vybíjecí proud*.
- *Vybíjecí proud*
- *Jednotky* – volba jednotek času v hodinách (Time) nebo Ah (Ampere-hour) na x ose grafu.



Obrázek 38: Vlastnosti akumulátoru - Zobrazení vybíjecích charakteristik

Poslední záložkou *Dynamika akumulátoru*, (Obrázek 39) se nastavuje časová konstanta akumulátoru. Tento čas je definován jako časový úsek mezi odezvou napětí na skokovou změnu proudu a nárůstem napětí na hodnotu 95%.



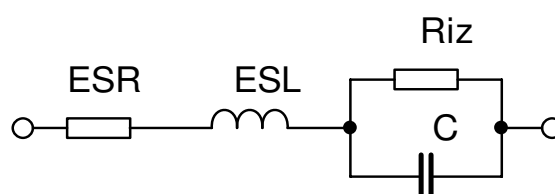
Obrázek 39: Vlastnosti akumulátoru - Časová odezva



### 2.3.2 Ultrakapacitorová baterie

Ultrakapacitorová baterie představuje sekundární zdroj energie, který zabezpečuje rychlou výměnu energie v soustavě. Ultrakapacitor funguje podobně jako elektrolytický kondenzátor a dokáže uskladnit elektrickou energii ve formě elektrostatického náboje, tedy bez nutnosti její další přeměny, jak tomu je u elektrochemických akumulátorů. To vysvětluje jeho mnohem lepší elektrické vlastnosti a téměř nulovou teplotní závislost. Vnitřní struktura ultrakapacitoru sestávajícího se ze dvou elektrod pokrytých tenkou vrstvou aktivního uhlíku, který vzhledem ke své vysoké pórovitosti několikanásobně zvyšuje aktivní plochu elektrod a tím dosahuje ultrakapacitor kapacit řádově až tisíce Faradů.

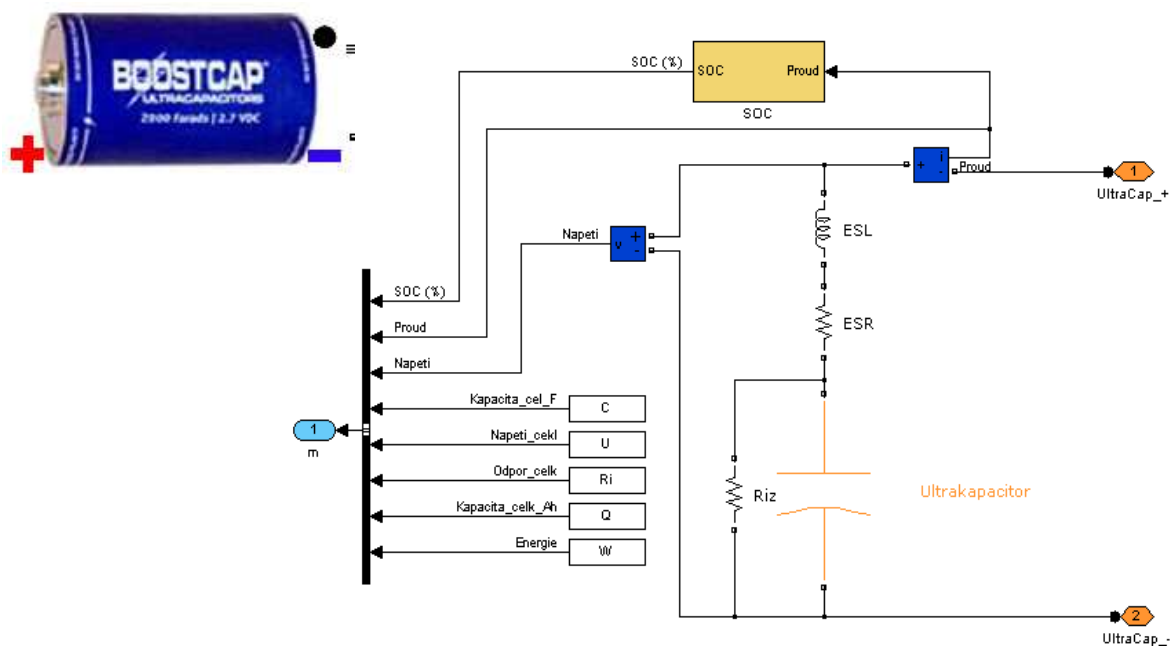
Vnitřní struktura a chování ultrakapacitoru se z velké části shoduje s elektrolytickým kondenzátorem, jehož náhradní schéma je uvedeno na obrázku 40. (26)



Obrázek 40: Náhradní schéma kondenzátoru

#### 2.3.2.1 Popis modelu Ultrakapacitor z Matlab-Simulink SimPowerSystems

Model simulačního bloku ultrakapacitorové baterie (Obrázek 41) jehož vnitřní struktura popisuje pomocí R, L, C prvků z knihovny SimPowerSystems náhradní schéma kondenzátoru (Obrázek 40). Blok je doplněn o měření napětí a proudu a výpočtovým blokem SOC.



Obrázek 41: Zástupný symbol a vnitřní struktura subsystému modelu ultrakapacitorové baterie

Blok obsahuje tři přípojný terminály:

- + Kladný pól ultrakapacitorové baterie
- Záporný pól ultrakapacitorové baterie

*m* Měřicí výstup obsahující osm signálů:

<i>Proud (A)</i>	Aktuální hodnota odebíraného nebo dodávaného proudu.
<i>Napětí (V)</i>	Informace o aktuální hodnotě napětí na ultrakapacitoru.
<i>SOC (%)</i>	Informace o stavu nabití ultrakapacitoru určené vztahem [3.35].
<i>Kapacita_cel_F</i>	Celková kapacita ultrakapacitorové baterie složené ze sériového spojení kondenzátorů definovaná následujícím vztahem.

$$C = \frac{C_{\text{čládku}}}{n} \quad (\text{F}; \text{F}, -) \quad [3.37]$$

*Napeti\_celk* Celková hodnota napětí sériově řazených kondenzátorů.

$$U = n \cdot U_{\text{čládku}} \quad (\text{V}; -, \text{V}) \quad [3.38]$$

*Odpor\_celk* Suma vnitřních odporů článků.

$$R_i = n \cdot R_{\text{čládku}} \quad (\Omega; -, \Omega) \quad [3.39]$$

*Kapacita\_celk\_Ah* Ampér-hodinová kapacita ultrakapacitorové baterie.

$$Q = \frac{C \cdot U}{3600} \quad (\text{Ah}; \text{F}, \text{V}) \quad [3.40]$$

*Energie* Maximální hodnota energie složitelné v ultrakapacitorové baterii definuje vztah [3.41].

Celková energie elektrického pole o napětí  $U$ , uložená v ultrakapacitoru o kapacitě  $C$  je dána následujícím vztahem.

$$W_{UC} = \frac{CU^2}{2} \quad (\text{J}; \text{F}, \text{V}) \quad [3.41]$$

S ohledem na klesající účinnost přečerpávání energie při klesajícím napětí se jeví jako akceptovatelné vybíjení ultrakapacitoru na 50% jmenovitého napětí. Jeli počáteční hodnota napětí na ultrakapacitoru  $U$ , potom představuje tato podmínka přípustný pokles napětí při vybíjení na velikost  $0,5U$  (SOC = 50%). Energie  $W_{UC}$ , která je za těchto podmínek dána k dispozici, je dána vztahem [3.42].

$$W_{UC} = \frac{C \left( U^2 - \frac{U^2}{4} \right)}{2} = \frac{3}{8} CU^2 \quad (\text{J}; \text{F}, \text{V}) \quad [3.42]$$

Z výrazu [3.42] vyjádříme potřebnou kapacitu ultrakapacitoru.

$$C = \frac{8W_{UC}}{3U^2} \quad (F; J, V) \quad [3.43]$$

Při určení celkové instalované kapacity ultrakapacitorů je nutné respektovat účinnost konverze energie ze ultrakapacitorů do trakčního motoru a dále je nezbytné počítat s energetickou rezervou. To znamená, že potřebná kapacita ultrakapacitoru, bude muset být s ohledem na tyto faktory zvýšena. Míru navýšení kapacity lze stanovit na základě odhadu účinnosti elektronických měničů a potřebné bezpečnostní rezervy. Při uvažování účinnosti výkonových částí měničů  $\eta = 0,8$  a bezpečnostní energetické rezervy ve výši 80% celkové využitelné energie, je celková instalovaná kapacita ultrakapacitoru přibližně vyjádřena vztahem [3.44].

$$C_{UCr} = 2C_{UC} = \frac{16W_{UC}}{3U^2} \quad (F; J, V) \quad [3.44]$$

Následně energie ultrakapacitoru  $W_{UC}$  s respektováním účinnosti konverze energie z ultrakapacitorů do trakčního motoru a energetickou rezervou bude:

$$W_{UCr} = \frac{3U^2 C_{UCr}}{16} \quad (J; V, F) \quad [3.45]$$

Nyní můžeme odhadnout (odhadnout, jelikož nebereme v úvahu účinnosti konverze energie a jízdní odpory), jakou dráhu lze urazit při určité energii.

Mechanická práce závisí na síle, která na těleso působí a na dráze, po které se těleso pohybuje.

$$W = Fs \quad (J; N, m) \quad [3.46]$$

Dosadíme-li za sílu  $F$  hnací sílu  $F_h$  vozidla a za práci  $W$ , energii ultrakapacitoru  $W_{UC}$ , vyjádříme dráhu, kterou je vozidlo schopno urazit. (27)

$$s = \frac{W_{UCr}}{F_h} = \frac{3C_{UCr}U^2}{16F_h} \quad (m; F, U, N) \quad [3.47]$$

### 2.3.2.2 Konfigurace parametrů bloku Ultrakapacitor

Dvojitým kliknutím na ikonu bloku *Ultrakapacitor* se zobrazí okno vlastností (Obrázek 42) s následujícími parametry:

- Počet sériově řazených článků ( $ks$ )
- Kapacita článku ultrakapacitorové baterie ( $F$ ) – určuje majoritní vlastnost jednoho článku ultrakapacitorové baterie.
- Maximální napětí jednoho článku ( $V$ )
- ESR – sériový odpor kondenzátoru ( $m\Omega$ ) - (Equivalent Series Resistance) reprezentující ohmický odpor elektrod a přípojných terminálů.

- $R_{iz}$  – *izolační odpor dielektrika ( $M\Omega$ )* - ztráty způsobené vodivostní složkou proudu. U ideálního kondenzátoru je tato hodnota nekonečná, u reálného způsobuje postupné vybíjení kondenzátoru malým svodovým proudem.
- $ESL$  – *sériová indukčnost přívodů kondenzátoru ( $nH$ )* - indukčnost elektrod a přívodů, jejíž hodnota se pohybuje v jednotkách  $nH$ .

**Block Parameters: Ultrakapacitor**

Ultrakapacitor (mask)

Model ultrakapacitorove baterie.  
Vsechny clanky v baterii jsou spojeny do serie. Volba poctu clanku a parametru jsou vztazeny pro jeden clanek.  
Vystupni terminaly bloku jsou kladny a zaporny pol ultrakapacitorove baterie a merici vystup m.

**Parameters**

Pocet seriove razenych clanku (ks)  
17

Kapacita clanku superkapacitorove baterie (F)  
3000

Maximalni napeti jednoho clanku (V)  
2.7

ESR - seriovy odpor kondenzatoru (mOhm)  
0.588

Riz - izolacni odpor dielektrika (MOhm)  
1000

ESL - seriova indukcnost privodu a elektrod kondenzatoru (nH)  
1

OK Cancel Help Apply

Obrázek 42: Vlastnosti Ultrakapacitoru

## 3 Popis platformy CityEL

### 3.1.1.1 Řešení problematiky elektromobilů na Katedře elektroniky

Vědecko-výzkumná činnost Katedry elektroniky má již z minulosti bohaté zkušenosti, jak v oblasti trakce, výkonových pohonů, moderních metod řízení střídavých elektrických strojů, tak i z oblasti elektrických vozidel. Prvním elektromobilem na katedře bylo vozidlo značky Škoda Beta resp. Tatra Beta EL poháněné asynchronním motorem s kotvou nakrátko o jmenovitém výkonu 18kW.

Na zkušenostech tohoto projektu, z oblastí konstrukce výkonového měniče, návrhu pohonného systému, mikroprocesorového řízení a jízdních vlastností elektromobilu, navazuje následující projekt s lehkým tříkolovým vozidlem CityEL.

## 3.2 Experimentální vozidlo CityEL

CityEL je lehké tříkolové elektrické vozidlo (Obrázek 43), které vyrábí německá firma Smiles AG<sup>5</sup>, dřívejší CityCom AG. CityEL byl původně vyvíjen pod názvem Mini-EL, dánskou společností El Trans, a poprvé byl uveden na trh v roce 1987.



Obrázek 43: Experimentální vozidlo CityEL

CityEL je lehké tříkolové, jednosedadlové vozidlo, které řidič ovládá stejně jako u konvenčního automobilu, čili pomocí volantu, brzdového a plynového pedálu. Podvozek vozidla sendvičové konstrukce z ABS plastu s výplní PMMA pěny. Na tento kompozit je připevněna odpružená jednokolová přední a dvoukolová zadní náprava, která je hnací nápravou vozidla. Hnací motor je umístěn za řidičem, uprostřed nápravy. Mechanický výkon motoru je přiveden na kola zubovým řemenem. Vozidlo nemá diferenciál, ale pouze kluzně uložené pravé hnané kolo pro kompenzování rozložení mechanického momentu při jízdě obloukem. Brzdění vozidla je primárně zabezpečeno hydraulickými bubnovými brzdami na každém kole. Parkovací brzda je mechanická, u tohoto modelu je brzděno přední kolo, u novějších a modernějších modelů jsou již brzděny obě

---

<sup>5</sup> Německá firma Smiles AG, dříve Citycom AG, je výrobce a prodejce elektromobilů s více než 20 letou tradicí. Ve své nabídce má kromě elektrokol, osobních elektromobilů (CityEL, Beepo, Reva a Tazzari) i malý nákladní elektromobil (Obrázek 44). To, že se již nejedná o zkušební projekt, ale o sériovou produkci elektromobilů značí i fakt, že již bylo prodáno přes 9000 vozů, které již úspěšně urazily přes milióny kilometrů. (43)

zadní kola. Sekundární brzdění je možné zabezpečit hnacím elektromotorem, jehož brzdný moment je nutné volit s ohledem na mechanické vlastnosti převodu se zubovým řemenem.

### 3.2.1.1 Základní parametry elektromobilu CityEL

Váha a rozměry:

Pohotovostní hmotnost	260 kg (včetně LiFePO <sub>4</sub> baterií)
Užitná hmotnost	120 kg
Celková hmotnost	400 kg
Výška	1260 mm se zavřenou střechou 2380 mm s otevřenou střechou
Délka	2741 mm
Šířka	1060 mm
Rozvor kol	1810 mm
Rozchod kol	930 mm
Světlost nad zemí	120 mm
Poloměr otáčení	8,5 m

Motor a pohon:

(volba motorů dle volby pohonné soustavy)

Stejnoseměrný motor s permanentními magnety

1,175 kW, 2700 min<sup>-1</sup>, 36 V

Třífázový synchronní motor s permanentními magnety

1,445 kW, 3000 min<sup>-1</sup>, 48 V

Rozvod

Plochý zubový řemen 800 5M 32

Napájecí zdroje elektromobilu:

(volba zdrojů dle volby pohonné soustavy)

Olověný akumulátor 36 V/100 Ah - 3x CT100-12i – 12 V/100 Ah

LiFePO<sub>4</sub> 80 V/80 Ah – 24 x 2 x 3,3 V/40 Ah

Ultrakapacitor 176 F/46 V/186 kJ - 17x 3000 F/2,7 V/11 kJ

Karoserie a podvozek:

Karoserie

Sendvičová struktura - PMMA+ABS+PUR

Kola

3 x 80/70 – 16"



Obrázek 44: Elektrokolo, osobní i nákladní elektromobily od firmy Smiles AG (43)

### 3.3 Vývojové etapy vozidla CityEL

Vozidlo CityEL bylo darováno Katedře elektroniky v roce 2007 v dosti zuboženém stavu. V průběhu doktorského studia proběhla kompletní generálka podvozku vozidla, opět byla zprovozněna funkce brzd a řízení, byly překontrolovány a oživeny trakční akumulátory a repasován původní stejnosměrný motor.

V rámci řešení disertační práce byly zkonstruovány základní uzly řešených systémů pohonných jednotek. Tyto měniče jsou vyvinuty pro použití v mobilním prostředku, tedy s ohledem na robustnost konstrukce a dostatečné elektrické krytí.

Samotný konstrukční návrh měniče je spojen s výpočtem ztrát a dimenzováním chlazení měniče i ostatních prvků, největší důraz je však kladen na konstrukční uspořádání, které musí být funkční, prakticky aplikovatelné a jednoduše vyrobitelné a opravitelné. Na základě vybraných komponentů, jsou vytvořeny trojrozměrné modely jednotlivých součástí v CAD programu Autodesk Inventor, z kterých jsou zkompleťovány celé sestavy měniče a následně i ucelené pohonné jednotky. Tato sestava je nápomocná při vlastní realizaci a pro generování potřebné technické dokumentace.

Následovala montáž původního stejnosměrného motoru s permanentními magnety se jmenovitým napětím 36 V a výkonem 1,1 kW a třech olověných 12 V/100 Ah baterií. Pro první oživení vozidla a odzkoušení jeho jízdních vlastností, byl do vozidla nainstalován jednokvadrantový stejnosměrný měnič. S touto pohonnou soustavou (viz kapitola 5.1) byly provedeny první jízdní testy a ověřeny základní simulační výsledky.

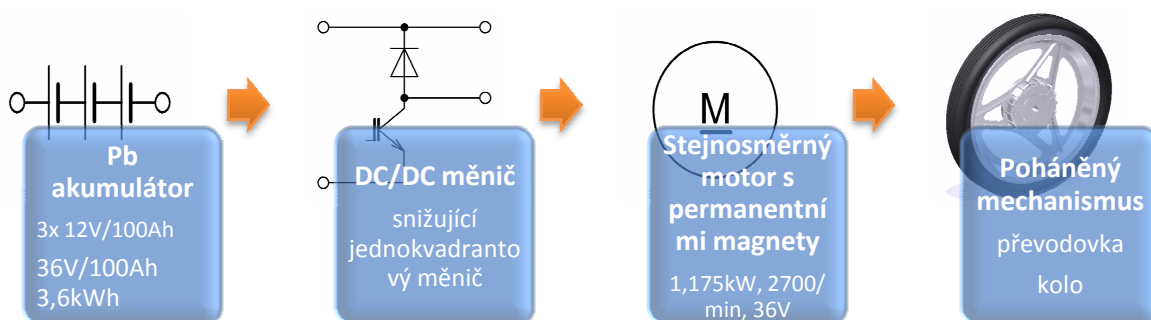
Následný výzkum se zaměřil na ověření vlastností jiného napájecího zdroje – ultrakapacitoru. Z vozidla byly odstraněny olověné baterie a nahrazeny pouze ultrakapacitorovou baterií s vlastním DC/DC měničem. Byly provedeny jízdní testy pouze se zdrojem z ultrakapacitorů a testována dynamika pohonu (viz kapitola 5.2) a dojezdová vzdálenost vozidla při různých jízdních profilech.

Dalším, již razantním krokem byla celková modernizace pohonné soustavy, kdy byly vyměněny baterie, polovodičový měnič i motor a opět byla na soustavě provedena měření (viz kapitola 5.3).

#### 3.3.1 Pohonná jednotka elektromobilu se stejnosměrným měničem a DC motorem napájeným z olověných akumulátorů

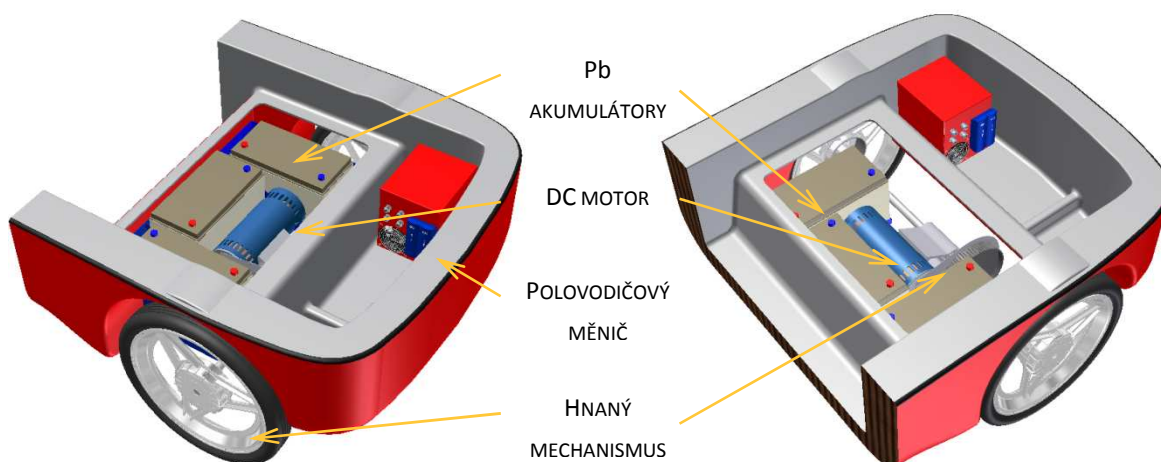
Uspořádání pohonné soustavy (Obrázek 45) je typické pro většinu elektromobilů. Jedná se o napájení motoru pouze z jednoho zdroje - trakční baterie. Z předchozích kapitol již víme, že slabinou této koncepce je právě samotná trakční baterie. Její kapacita je rozhodující pro dojezd a dynamiku elektromobilu. V neposlední řadě je také podstatná hmotnost článků. Běžná trakční olověná baterie dosahuje 40 Wh/kg, NiMH 80 Wh/kg, Li-ion 100-250 Wh/kg. Pro srovnání, mějme akumulátor u elektromobilu s dojezdem odpovídajícím plné 40 l nádrži benzínu (30 kg). Potom jeho hmotnost, pokud bude složený z moderních článků, bude povídat teoretické hmotnosti 400-500 kg, nebo přes 1000 kg běžných olověných akumulátorů. Hlavním zdrojem energie je dobíjení článků z distribuční sítě, které může být rozšířeno o dobíjení rekuperační energií při brzdění elektromobilu anebo jízdě z kopce.

Na elektromobilu CityEL byla jako první sestavena původní pohonná sestava vozidla (Obrázek 45). Napájecím zdrojem tohoto systému jsou tři trakční olověné akumulátory, zapojené do série, s výsledným napětím 36 V a kapacitou 100 Ah.



Obrázek 45: Blokové schéma pohonné soustavy s DC motorem

Konstrukční uspořádání komponentů zobrazuje 3D CAD model na obrázku 46. Olověné akumulátory, každý o váze 32 kg, jsou symetricky rozloženy kolem motoru hned za sedadlem řidiče. Stejnoseměrný motor je speciálním držákem umístěn na ose zadní nápravy. Převodovkou s plochým zubovým řemenem je převáděn moment z motoru na kola s převodovým poměrem 8,6. V zadní části vozidla je umístěn výkonový polovodičový měnič. Řídicí signály měniče, kterými jsou



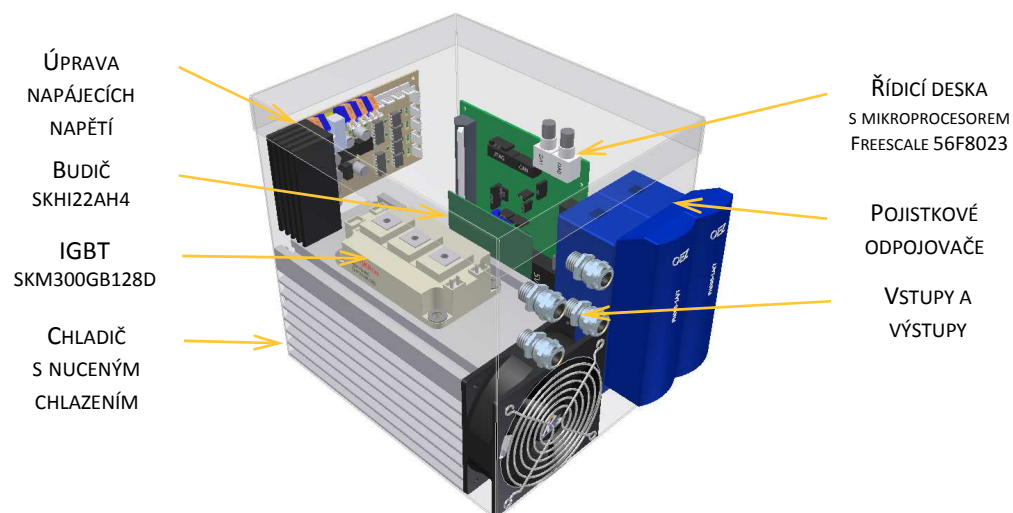
Obrázek 46: CAD model zadní části vozidla CityEL s pohonnou soustavou s Pb akumulátory a stejnosměrným pohonem

zapnutí/vypnutí měniče jsou voleny řidičem přímo z palubní desky vozidla, zadávání požadovaných otáček motoru je prováděno sešlápnutím pedálu (originální „plynový“ pedál pro vozy Škoda Fabia s odporovým výstupem). Volba směru jízdy vpřed/vzad je volena přepnutím polaritu napětí na kotvě stejnosměrného motoru s permanentními magnety.



### 3.3.1.1 Polovodičový měnič

Tento typ měniče byl pro vozidlo CityEL vybrán ze dvou důvodů, a to protože ve vozidle byl nainstalován stejnosměrný motor a také pro jednoduchost konstrukce a řízení. Běžné stejnosměrné měniče jsou v podstatě periodicky spínané stejnosměrné spínače. Jednoduchost



Obrázek 47: CAD model stejnosměrného měniče

obvodů a velká šíře parametrů IGBT tranzistorů zapříčinila pokles ceny a velký rozmach tohoto typu měničů. Jejich prostřednictvím se na zátěž přikládá pulsní průběh napětí, jehož střední hodnota je při vhodném řízení řiditelná.

Výkonová část měniče se sestává s IGBT modulu Semikrom SK300GB128D, který je umístěn na hliníkovém chladiči s nuceným chlazením. Tento tranzistor svými parametry s dostatečnou napěťovou i výkonovou rezervou pokrývá požadavky motoru i celého pohonného systému. Ze zkušeností z předchozích konstrukcí byl budič obvodem výkonového IGBT zvolen budič SKHI22AH4, taktéž od firmy Semikron. Řídicí obvod, mikroprocesorový obvod Freescale 56F8023, dle informace o pozici plynového pedálu, která byla upravena a A/D převodníkem převedena do mikroprocesoru, generoval PWM signál s příslušnou střídou, odpovídající požadované střední hodnotě napětí a proudu.

### 3.3.1.2 Stejnosměrný motor s permanentními magnety

Tříkolové vozidlo CityEL je standardně osazeno stejnosměrným motorem s permanentními magnety následujících parametrů:

výrobce: Pacific Scientific Inc.

typ: BA3740-4568-1

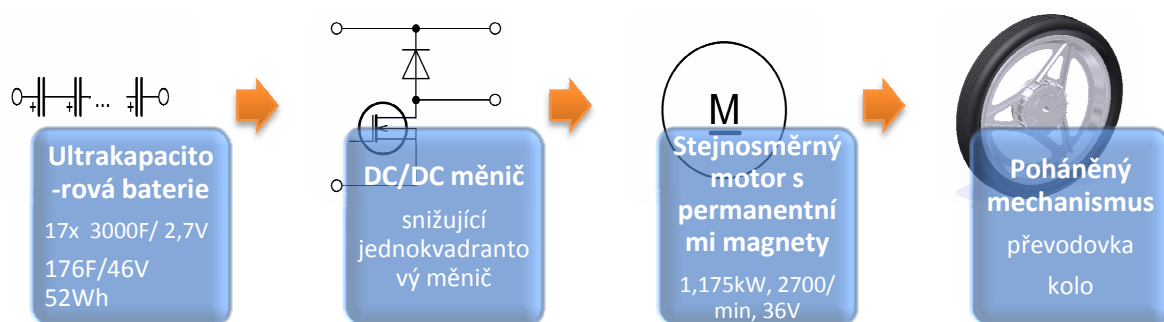
Jmenovité stejnosměrné napájecí napětí  $U_n = 36 \text{ V}$

Jmenovitý výkon  $P_n = 1,175 \text{ kW}$

Jmenovité otáčky  $n_n = 2700 \text{ min}^{-1}$

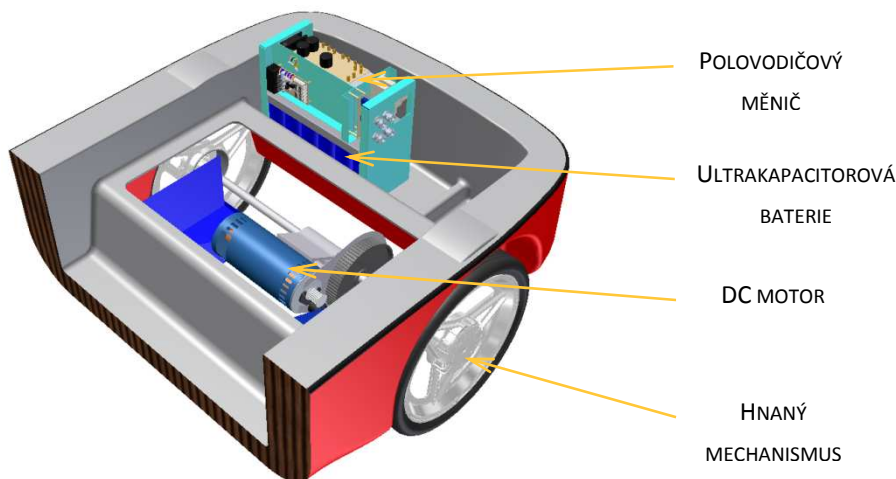
### 3.3.2 Pohonná jednotka elektromobilu se stejnosměrným měničem a DC motorem napájeným z ultrakapacitorové baterie

Následující blokové schéma (Obrázek 48) má obdobnou blokovou strukturu, jako v předchozí kapitole. Základní rozdíl je v zásobníku elektrické energie, kterou je pouze ultrakapacitorová baterie. Tato baterie se skládá ze sériového spojení ultrakapacitorů. Nevýhodou tohoto pohonného systému je, že ultrakapacity mají relativně malou kapacitu (maximálně 30 Wh.kg<sup>-1</sup>) a tedy nedovedou dodávat energii po delší dobu. Tohoto pohonného systému lze ovšem využít v aplikacích, kde požadujeme dodání nebo vydání vysokého výkonu (proudu) po krátkou dobu.



Obrázek 48: Blokové schéma pohonné jednotky soustavy s DC motorem a ultrakapacity

Z vozidla byly odstraněny 3 olověné akumulátory čímž se vozidlo odlehčilo téměř o 100 kg a do zadní části byl umístěn měnič se sedmnácti ultrakapacity. Parametry celé ultrakapacitorové baterie byly 176 F, 46 V, 52 Wh, 9 kg.

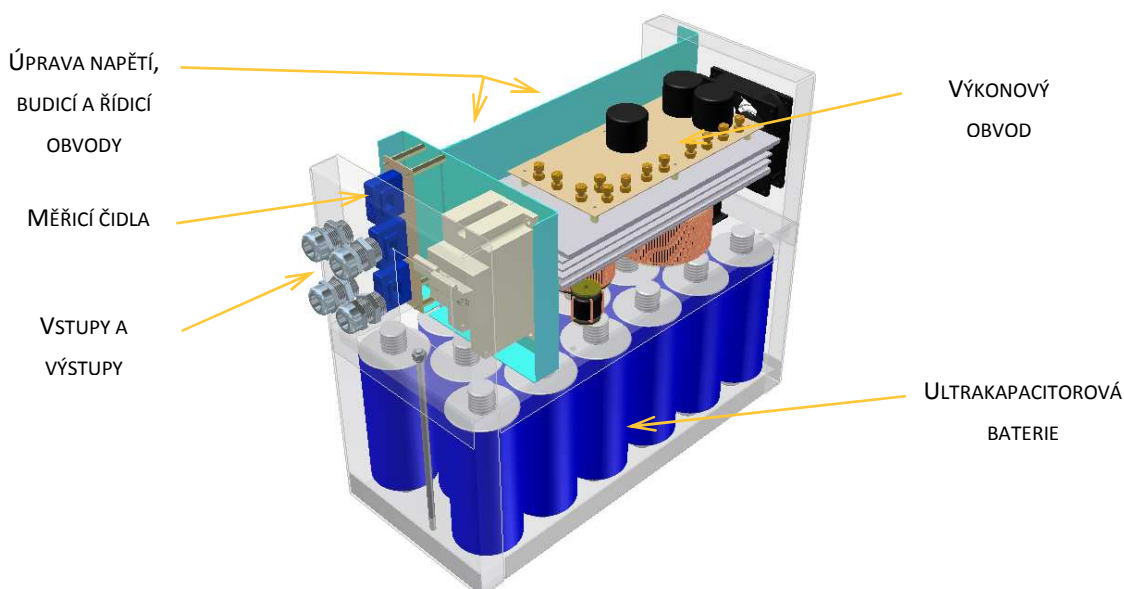


Obrázek 49: CAD model zadní části vozidla CityEL s pohonnou soustavou s ultrakapacity a stejnosměrným pohonem

#### 3.3.2.1 Polovodičový měnič

Pro testování byl do vozidla umístěn měnič s ultrakapacitorovou baterií (Obrázek 50). Původní funkce měniče byla regulace vstupního napětí (např. z palivového článku, malé

elektrocentrály) a následná regulace výstupního napětí na konstantní hodnotu pro stejnosměrný motor. Poněvadž v tomto případě se jedná pouze o napájení motoru z ultrakapacitorové baterie, tj. bez dalšího sériově či paralelně vřazeného zdroje, byl měnič upraven jako snižující měnič s tranzistory MOSFET.

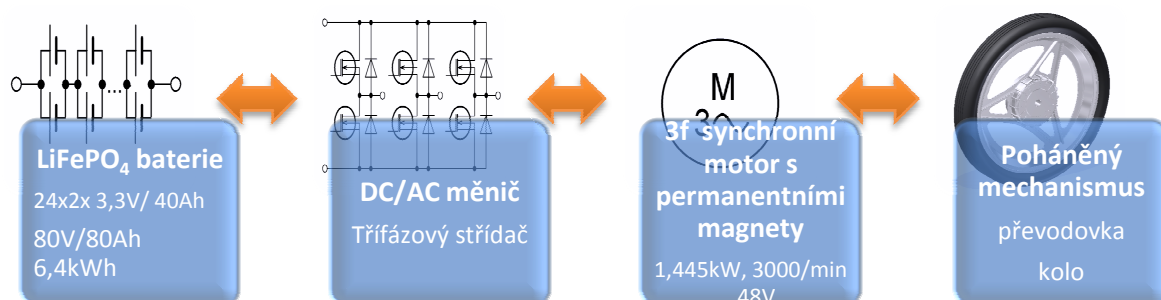


Obrázek 50: CAD model měniče s ultrakapacitor

Řízení měniče bylo realizováno pomocí mikroprocesoru Freescale 56F8023. Program zahrnoval jak vlastní řízení spínacího prvku s PWM s řízením rozběhu motoru s proudovým omezením, tak zpracování signálů z čidel, které snímaly napětí ultrakapacitorové baterie, proud tekoucí do motoru, rychlost a ujetou vzdálenost vozidla. Vzhledem k nízkému výkonu použitého motoru se rozběh s proudovým omezením neosvědčil jako úsporný, ba naopak znemožňoval jízdu vozidla do vrchu při udržení žádané rychlosti.

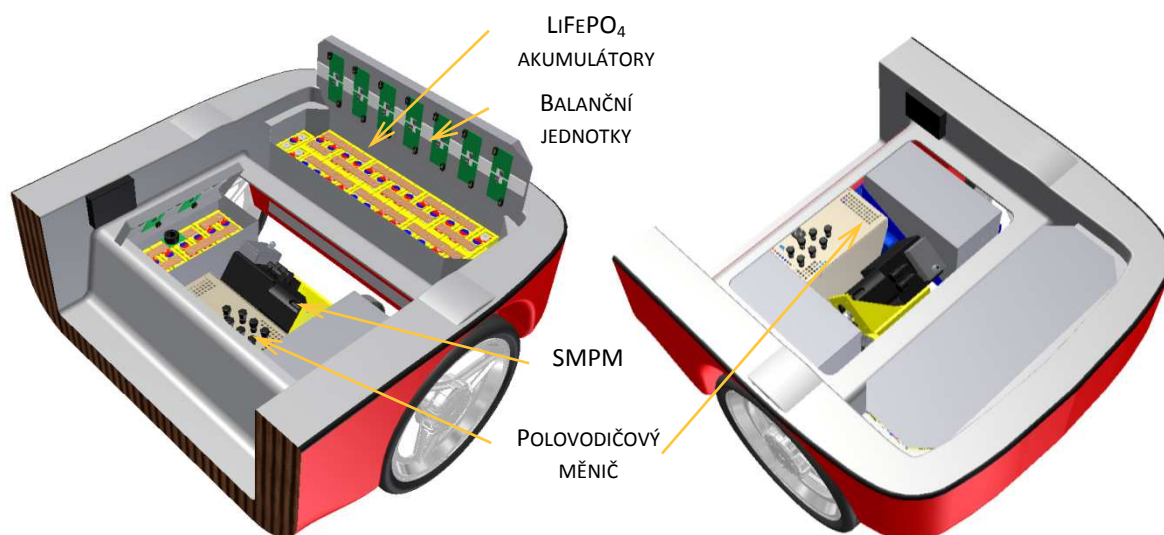
### 3.3.3 Pohonná jednotka elektromobilu se střídavým měničem a synchronním motorem s permanentními magnety napájeným z $\text{LiFePO}_4$ akumulátorů

Následující soustava představuje řešení pohonu pro elektromobily, či hybridní automobily. Soustava je napájena lithium-železo-fosfátovými akumulátory, doplněnými balančními jednotkami



Obrázek 51: Blokové schéma pohonné soustavy se synchronním motorem s permanentními magnety

každého akumulátoru, jejichž funkce je ovládána centrální řídicí jednotkou. Akčním členem pohonné soustavy je třífázový střídač s MOSFET tranzistory řízenými šestnáctibitovým mikrokontrolérem Freescale, do něhož je implementována moderní metoda řízení bezsenzorové vektorové regulace. Posledním prvkem elektrického pohonu je motor s vysokou účinností - synchronní motor s permanentními magnety. U této pohonné jednotky bylo využito rekuperačního brzdění pro dobíjení akumulátorů. Nicméně obdobně, jako u předchozích pohonných systémů je hlavním zdrojem energie akumulátorových článků energie z distribuční sítě.

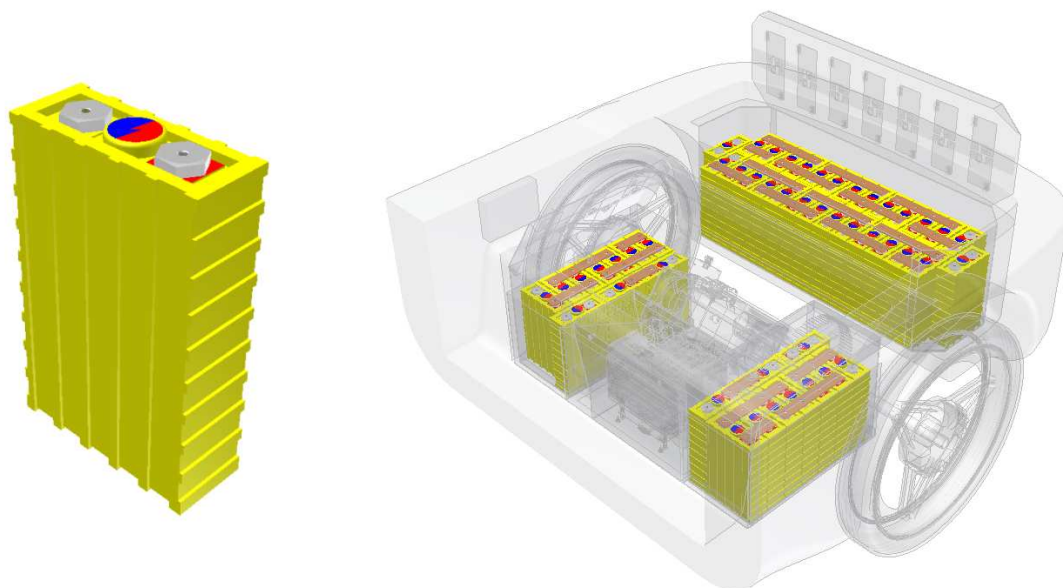


Obrázek 52: CAD model zadní části vozidla s pohonem se SMPM a LiFePO<sub>4</sub> akumulátor

Modernizace pohonu si vyžádala konstrukci nových komponentů, jakými jsou například: držák SMPM motoru, uchycení měniče ve vozidle, boxy pro LiFePO<sub>4</sub> akumulátory, konstrukční uspořádání balančních jednotek, aj.

### 3.3.3.1 Akumulátory LiFePO<sub>4</sub>

Ve vozidle CityEL je celkem 48 článků, které jsou sérioparalelně propojeny, a to vždy po dvou paralelních dvojicích tvořící jeden článek o kapacitě 80 Ah. Následně je těchto 24 dvojic sériově propojeno v jednu akumulátorovou baterii o parametrech 80 V, 80 Ah, 6,4 kWh. Tato baterie je ve vozidle umístěna ve třech boxech (Obrázek 53), 2x po 10 kusech vpravo a vlevo od motoru a 28 kusů je umístěno v zadní části vozidla v dřívějším „zavazadlovém“ prostoru.

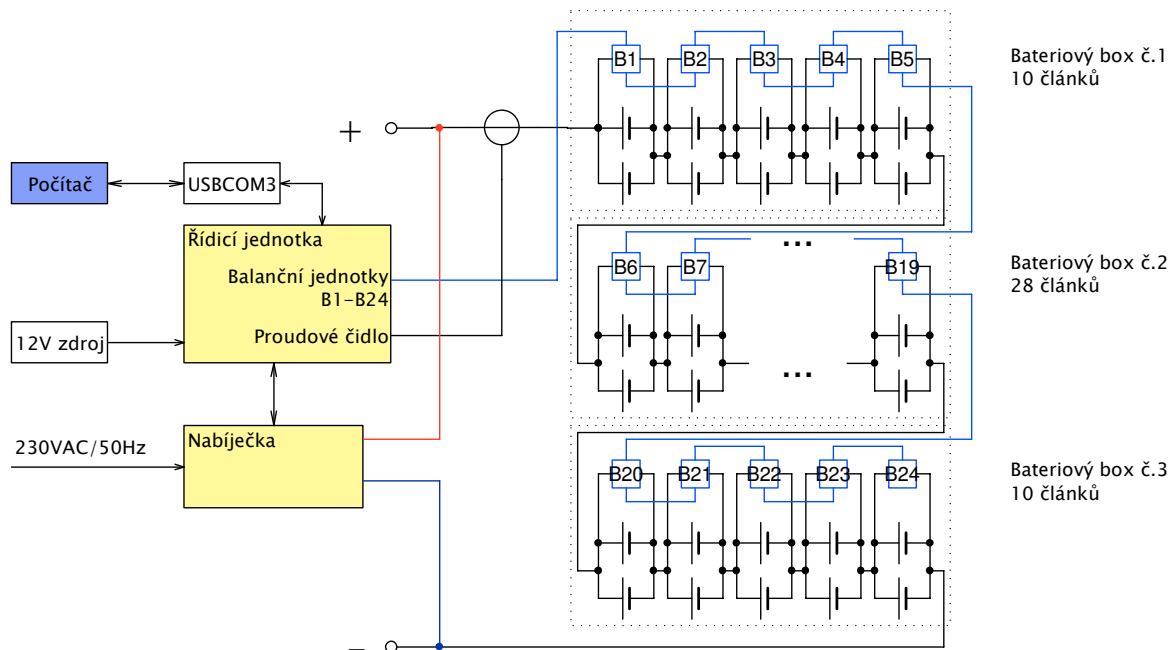


Obrázek 53: CAD model článku LiFePO<sub>4</sub> a umístění akumulátorových sestav ve vozidle CityEL

### 3.3.3.2 Balanční jednotka pro LiFePO<sub>4</sub> akumulátory

Modernizací pohonné jednotky vozidla CityEL zahrnovala i výměnu stávajících olověných baterií za moderní Lithium-železo-fosfátové baterie. Přes nesporné výhody tohoto typu akumulátoru, je jejich slabinou nutnost použití balančních jednotek při nabíjení článků. Balanční jednotky včetně řídicího modulu (BMS – Battery Management System), proudového snímače a modulu pro komunikaci s počítačem byly vybrány od firmy MGM compro.

Balanční systémy („balancéry“) jsou elektronické moduly, které se připojují na každý

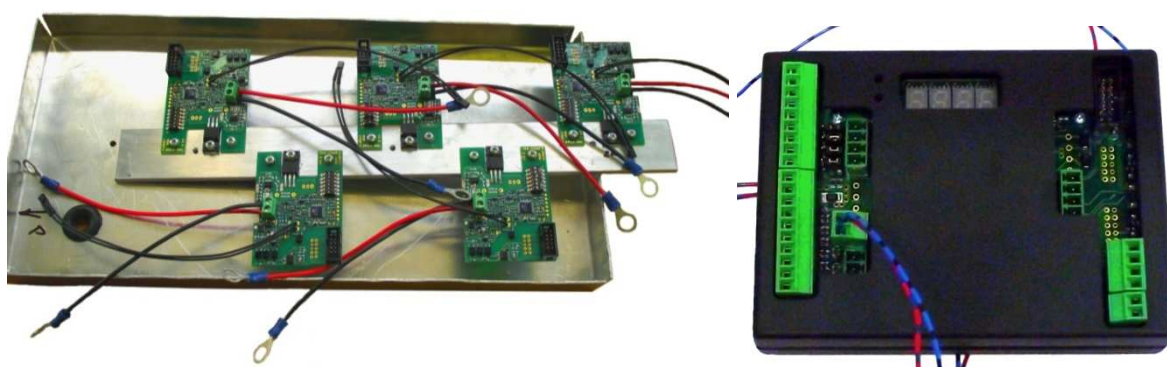


Obrázek 54: Schéma zapojení LiFePO<sub>4</sub> akumulátorové baterie, balančních jednotek a řídicího systému BMS



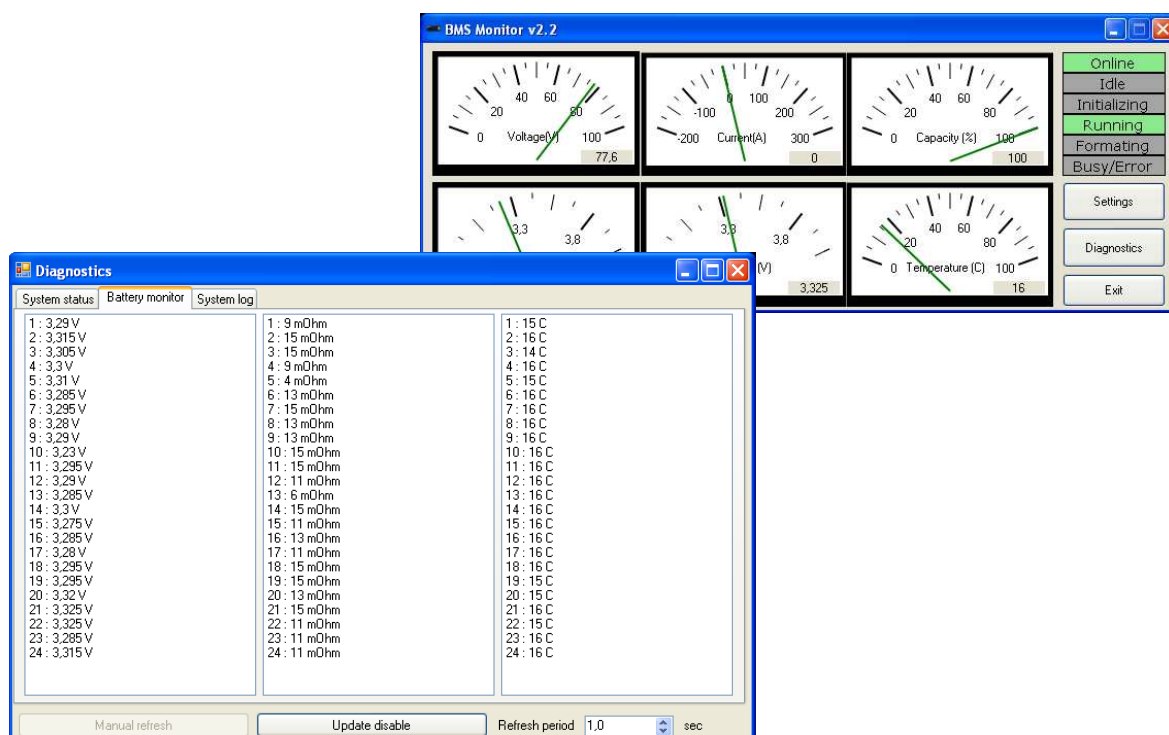
článek baterie (Obrázek 54). Jejich funkce je monitorování napětí a teploty článku a v případě nabíjecího procesu, kdy napětí na článku dosahuje maximální úrovně, začít s balancováním, tj. přepouštěním proudu na druhé, méně nabitě články. Balanční systém hlídá úroveň napětí na článcích i při provozu pohonu a informuje nadřazený řídicí systém BMS o aktuálních parametrech.

Nainstalovaná řídicí jednotka (BMS-2 MAST64) indikuje provozní stavy a sledované veličiny až 4 digitálními výstupy typu otevřený kolektor pro maximální proud 1 A a napětí 12 V pro indikátory typu LED diod nebo 12 V žárovek a 3 analogovými výstupy s napěťovým rozsahem 0 - 3,3 V nebo 0 - 10 V a jedním analogovým nebo frekvenčním výstupem. Pro informování o měřených stavech je možné využít i CAN sběrnice. Řídicí jednotka ukládá naměřená data, která lze



Obrázek 55: Montáž balančních jednotek a detail řídicí jednotky BMS

(pomocí galvanicky odděleného kabelu USBCOM3) přenést do připojeného počítače přes USB port, které je možné sledovat takřka v reálném čase a popřípadě uložit k pozdější analýze. Základní okna uživatelského prostředí programu *BMS monitoring* pro měření a sběr dat z balancérů LiFePO<sub>4</sub> článků je uvedeno na následujícím obrázku 56. (28)



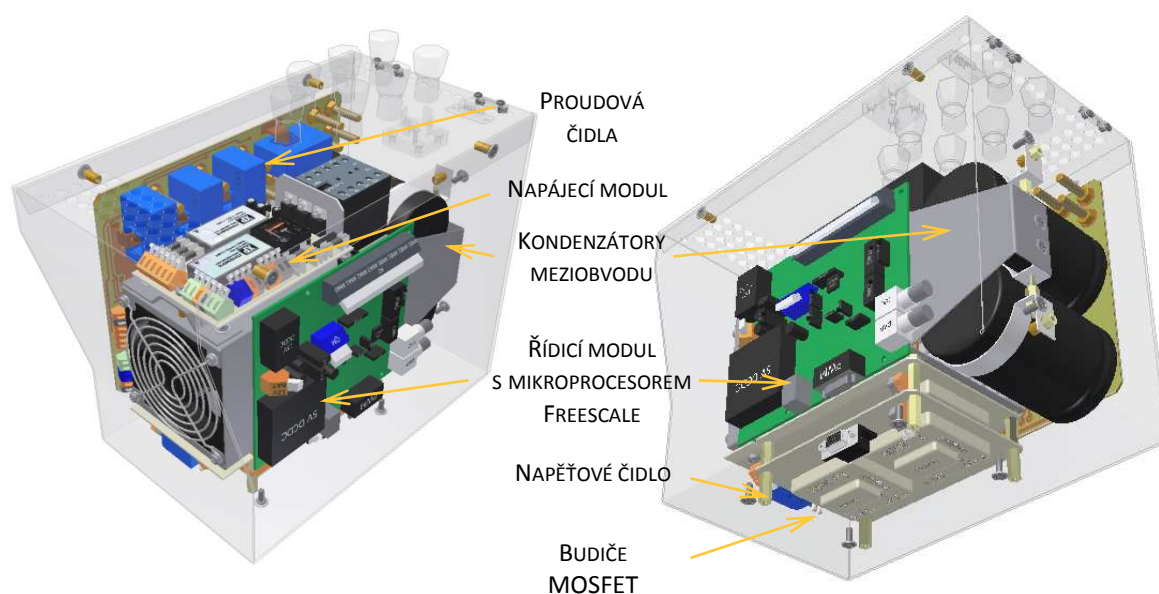
Obrázek 56: Uživatelské prostředí programu BMS monitoring

### 3.3.3.3 Polovodičový měnič

Nejdůležitějším požadavkem na polovodičový měnič je podobně jako u ostatních komponentů pohonné soustavy jeho spolehlivost. S ní souvisí řada dalších požadavků a nároků, které musí takový střídač splňovat. Jedním z nich je přetížitelnost resp. správné dimenzování celého obvodu s ohledem na proudové nároky, napěťové namáhání či chlazení. V dnešní době je již spousta výrobců, kteří se zaměřili na vývoj a výrobu polovodičových spínacích prvků, nabízející velký výběr pro konkrétní požadovanou aplikaci. A protože se většinou každý střídač navrhuje zvlášť pro konkrétní pohon, neměl by být problém z pohledu jeho sestavování a dimenzování tyto prvky správně zvolit. Jednou z firem, které se zaměřily na vývoj a výrobu polovodičových spínacích modulů s cílem nabídnout je automobilovému průmyslu je SEMIKRON®. (29)

Neméně důležitým kritériem určujícím celkovou spolehlivost řídicího výkonového obvodu je způsob chlazení. V praxi se využívají dva: vzduchové a kapalinové chlazení. Výhoda vzduchového chlazení spočívá v jeho cenové nenáročnosti, ovšem je omezen použitelností do relativně malých výkonů. U vyšších výkonů se používá chlazení kapalinové. Zde jsou ovšem potřebné naopak větší cenové náklady na vybudování chladicího okruhu s nutností dobré těsnosti systému a s ní spojenou údržbou. U vysokých výkonů je již ovšem použití vodního chlazení téměř nevyhnutelné.

Výkonový polovodičový měnič v blokové struktuře (Obrázek 51) je typu DC/AC a tedy rozstřídává stejnosměrné napětí na bateriích na střídavé třífázové napětí pro synchronní motor s permanentními magnety. Měnič je primárně navržen a určen k pohonu elektromobilu CityEL. Jeho konstrukce je dle tohoto požadavku uzpůsobena tak, aby jak výkonově, tak i mechanicky a



Obrázek 57: CAD model třífázového střídače

zástavbovým prostorem nahradil místo původního stejnosměrného měniče ve voze. Je určen pro spolupráci s motorem o jmenovitém výkonu 1500 W, jmenovitém fázovém proudu 54 A, maximálním fázovém proudu 200 A a napětím trakční baterie, respektive meziobvodu 80 V.

Konstrukce měniče je postavena na centrálním hliníkovém chladiči s nuceným oběhem vzduchu. Na tento chladič jsou osazeny tři MOSFET tvoří šesticí tranzistorů s šesticí k nim

antiparalelně zapojených diod. Z konstrukčního pohledu jej tedy tvoří tři moduly SK 260 MB 10. Navíc je v obvodu ještě jeden shodný modul, který je využíván jako chopper pro brzdový odpor (obvod chopper se při pozdějších měřeních nevyužíval). Mezní hodnoty těchto tranzistorů jsou:  $V_{DS} = 100 \text{ V}$ ,  $I_D = 230 \text{ A}$ ,  $R_{DSon} = 2,5 \text{ m}\Omega$ . Tranzistory jsou připájeny na společném výkonovém plošném spoji společně s proudovými čidly (LEM) a nabíjecími odpory kapacit v meziobvodu. Další moduly měniče jsou budičí obvody MOSFET tranzistoru (budiče SEMIKRON® typu SKHI22AH4), zdrojový modul, měření a mikroprocesorový modul. Řídicí modul je osazen výkonným procesorem Freescale® typu MC56F8037 v kterém je implementována řídicí metoda. (30)

### 3.3.3.4 Řídicí metoda synchronního motoru s permanentními magnety

V současné době jsou pro řízení střídavých strojů využívány především dvě metody: VC - vektorové řízení (Vector Control) a DTC - přímé řízení momentu (Direct Torque Control). Předchůdcem vektorového řízení je skalární řízení, u něhož však nebyl nezávisle řízen tok a moment což mělo za následek to, že byl stroj vhodně řízen pouze v ustáleném stavu. Nevýhody skalárního řízení odstraňuje řízení vektorové, které vyhovuje požadavkům z hlediska dynamiky pohonu a přesnosti regulace. Při vektorové regulaci je oproti skalárnímu řízení regulovaný stroj neustále optimálně buzen a to i během přechodného děje.

Druhou metodou regulace stroje je již zmíněné přímé řízení momentu. Výhody DTC spočívají v jednoduchosti a menších požadavcích na senzor polohy, kdy stačí určit pouze sektor u synchronního motoru s permanentními magnety. Ovšem, nevýhody DTC jsou nepřímá regulace proudů, větší zvlnění momentu a variabilní spínací frekvence, která kladé vyšší nároky na filtraci a způsobuje větší rušení. Ve speciální variantě může mít i DTC konstantní spínací frekvenci. Je patrné, že obě metody mají své klady i zápory. Záleží především na konkrétní aplikaci, která určí vhodnou metodu řízení. Návrhem a popisem řídicí metody pro pohon se synchronním motorem s permanentními magnety ve vozidle CityEL se detailně zabývá práce. (31)

### 3.3.3.5 Synchronní motor s permanentními magnety - SMPM

V posledních letech se výrazně rozšiřují aplikace synchronních strojů a to obzvláště s permanentními magnety. Stroje s permanentními magnety se staly standardem pohonných jednotek v průmyslových servopohonech a v současné době se jejich uplatnění rozšiřuje i do oblasti elektrické trakce a silničních vozidel.



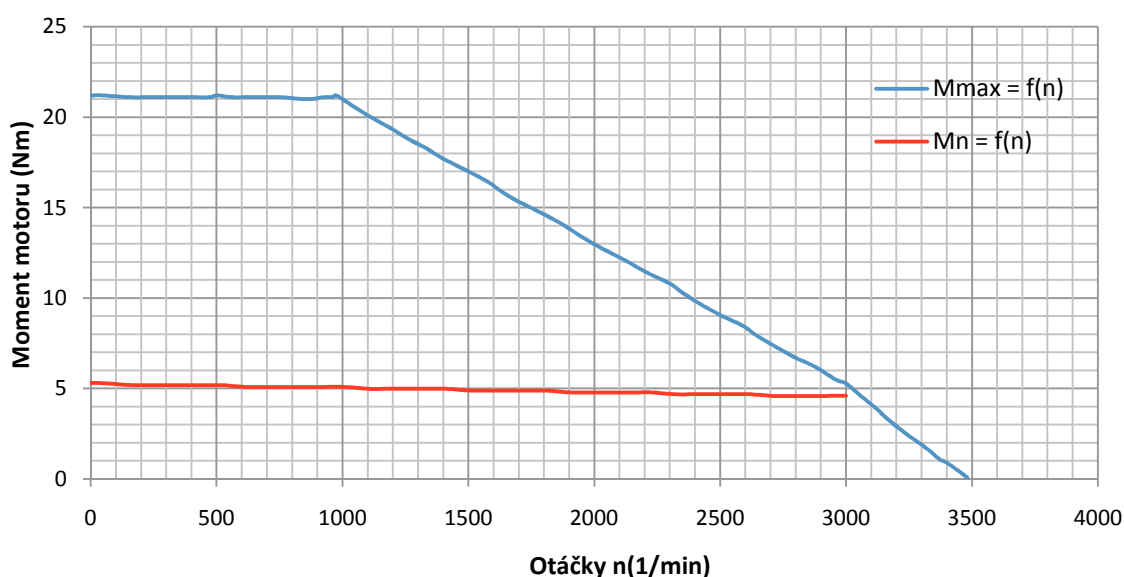
Obrázek 58: CAD model použitého SMPM s nezávislým chlazením



Z konstrukčního hlediska lze SMPM rozdělit do dvou skupin, na stroje s vnitřním a vnějším rotorem. První koncepci představuje stroj, který má statorové trojfázové vinutí uloženo v drážkách železného magnetického obvodu (obdobně jako u ASM). Do dutiny statoru je vložen rotor, nesoucí permanentní magnety. Druhou konstrukční variantou je řešení, kdy je trojfázový stator (pevně ukotven) a je obepínán rotorem s permanentními magnety.

U silničních vozidel, počínaje elektrokyly, přes osobní automobily a autobusy s elektrickým nebo hybridním pohonem až po speciální stavební stroje, je efektivním řešením použití motorů s vnějším rotorem, které jsou integrovány přímo do kol. U kolejových vozidel není integrace motoru s vnějším rotorem do konstrukce kola příliš výhodná, neboť toto řešení navyšuje množství neodpružené hmoty. U silničních vozidel jsou negativní vlivy neodpružených hmot částečně eliminovány pneumatikami. U kolejových vozidel individuálním pohonem kol, je z důvodu snížení množství neodpružených hmot výhodnější požití SMPM s vnitřním rotorem, přičemž přenos točivého momentu od motoru na kolo je provedeno kloubovým spojením.

Pro modernizaci vozidla CityEL byl zakoupen SMPM od společnosti TG Drives. Jedná se o motor vyrobený na zakázku dle požadovaných parametrů (Tabulka 4, Obrázek 59). Nejčastější konstrukční koncepce strojů s permanentními magnety, a použitý SMPM tomu není výjimkou, je



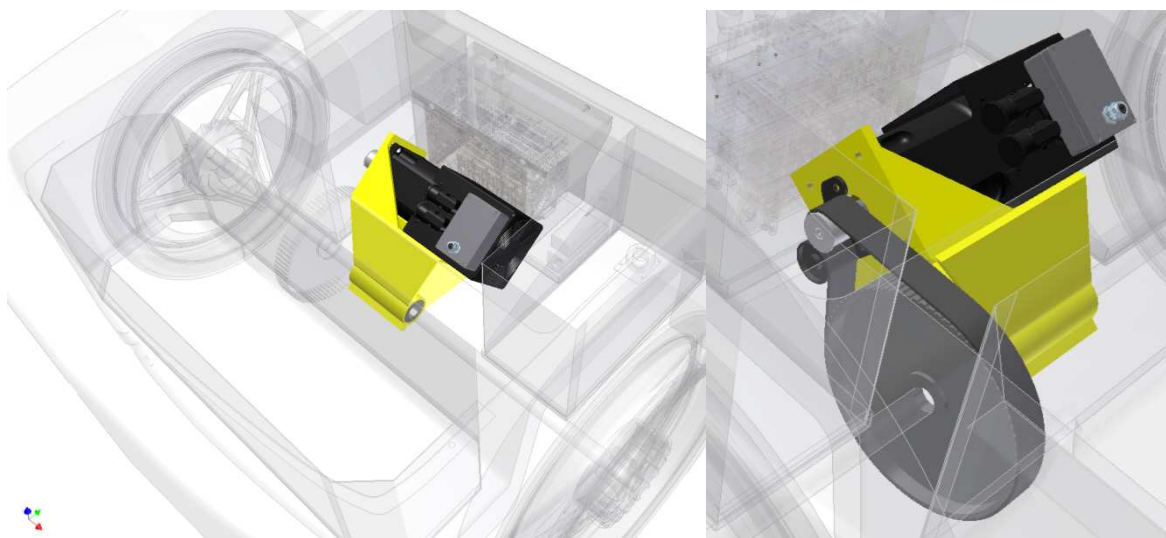
Obrázek 59: Grafická závislost momentové charakteristiky  $M = f(n)$  pro použitý SMPM (autor)

jejich připevnění na povrch rotoru. Stroj je navržen na malé napájecí napětí, což má mimo jiné důsledek ve velkých fázových proudech a relativně malé elektrické i mechanické časové konstantě. Taktéž jeho rozměry vzhledem ke svému výkonu cca 1,5 kW jsou poměrně malé. Stroj je přírubový a disponuje cizím chlazením, pro případ přetěžování. Chlazení je konstrukčně provedeno plechovým tunelem nasazeným na zadní část motoru, kterým ventilátor tlačí proud chladicího vzduchu kolem povrchu motoru. Motor je vybaven i inkrementálním čidlem, které generuje 2048 impulsů na otáčku a vytváří s motorem jeden kompaktní celek.

Tabulka 4: Parametry SMPM motoru (32)

Veličina		Veličina	
jmenovitá rychlost ( $n_n$ )	3000 min <sup>-1</sup>	statorový odpor ( $R_{2ph}$ )	0,05 $\Omega$
maximální rychlost ( $n_{max}$ )	12000 min <sup>-1</sup>	statorová indukčnost ( $L_{2ph}$ )	0,3 mH
jmenovité napětí ( $U_n$ )	30 V	napěťová konstanta ( $K_E$ )	8,6 mV/RPM
napětí meziobvodu ( $U_{DC}$ )	48 V	momentová konstanta ( $K_T$ )	0,14 Nm.A <sup>-1</sup>
jmenovitý proud ( $I_n$ )	34 A	elektrická čas. konstanta ( $T_{el}$ )	6,0 ms
maximální proud ( $I_{max}$ )	224 A	mechanická čas. konstanta ( $T_{el}$ )	1,1 ms
jmenovitý moment ( $M_n$ )	4,6 Nm	tepelná časová konstanta	64 min
maximální moment ( $M_{max}$ )	21 Nm	moment setrvačnosti	2,7 kgcm <sup>2</sup>
počet pólů (2p)	6		

Pro montáž a uchycení motoru do vozidla CityEL byl zkonstruován pevný a dostatečně tuhý držák. Celková sestava držáku s motorem byla nižší než v případě původního držáku se stejnosměrným motorem. Motor je s poháněnou nápravou spojen plochým zubovým řemenem s pevným převodovým poměrem 7,1.



Obrázek 60: CAD model uchycení SMPM na nápravě vozidla

## 4 Výsledky simulační

### 4.1.1 Vstupní parametry a vlastnosti vozidla CityEL

Z důvodu nedostupnosti detailních technických informací o vozidle CityEL musela být vstupní data pro simulaci experimentálně odměřena nebo získána z 3D CAD modelů.

Tabulka 5: Parametry vozidla CityEL a SMPM motoru

#### CityEL

Hmotnost vozidla s řidičem	m	400 kg
Moment setrvačnosti		
- převodovky	$J_p$	$2,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$
- kol	$J_k$	$0,38 \text{ kg.m}^2$
- celkový moment setrvačnosti	$J$	$0,383 \text{ kg.m}^2$
Aerodynamický koeficient	$c_x$	0,8
Čelní plocha vozidla	$A_x$	$1 \text{ m}^2$
Valivý odpor kol	$\xi$	0,03
Poloměr kola	$r_k$	0,265 m
Převodový poměr	$i$	7,1
Mechanická účinnost převodovky	$\eta$	0,9

#### Motor

Synchronní motor s permanentními magnety

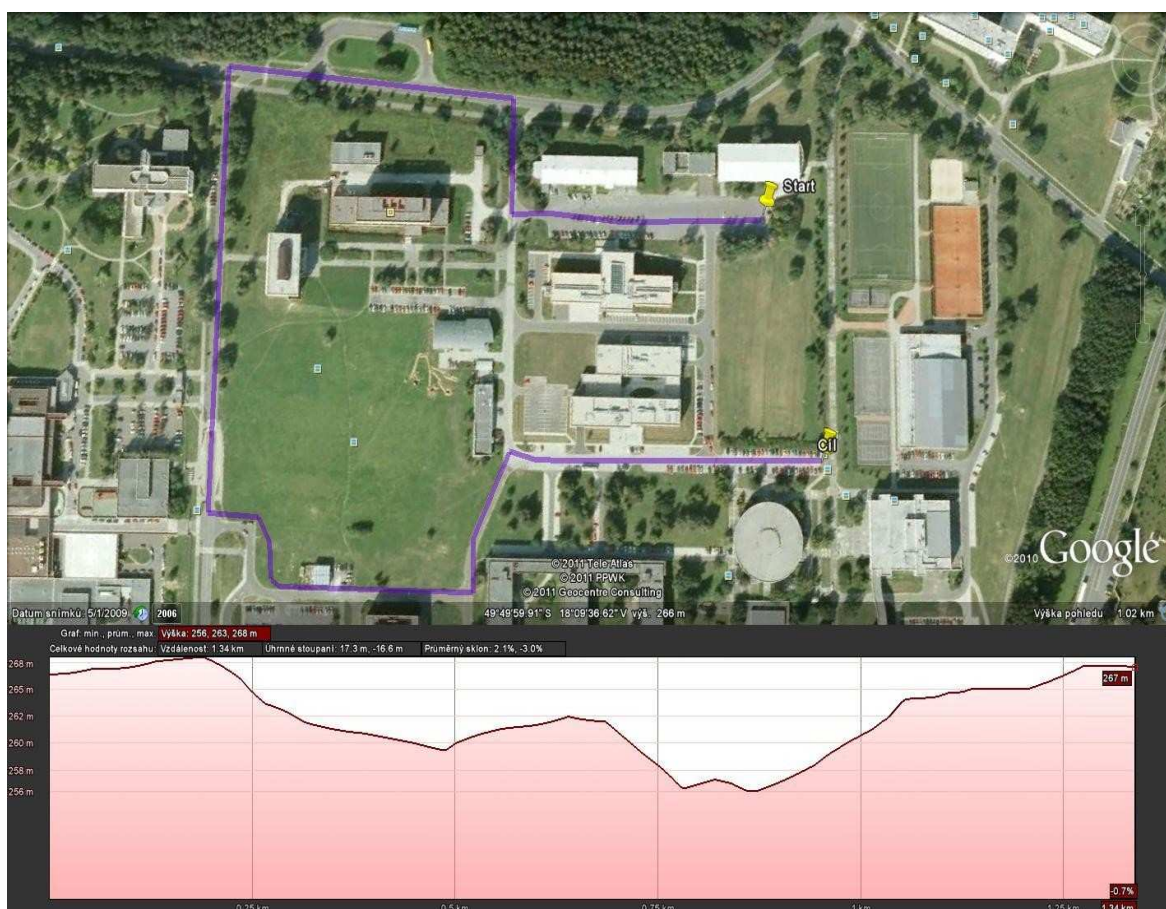
Jmenovité otáčky motoru	$n_n$	$3000 \text{ min}^{-1}$
Maximální otáčky motoru	$n_{\max}$	$12000 \text{ min}^{-1}$
Moment setrvačnosti	$J_M$	$0,27 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$
Jmenovitý moment motoru	$M_n$	4,6 Nm
Maximální moment motoru	$M_{\max}$	21 Nm

Verifikace, která zajistila validitu a reliabilitu simulačních modelů pohonných a zdrojových soustav (viz kapitola 2.2 Modelování dynamických vlastností vozidla v prostředí MATLAB® SIMULINK®), byla provedena na základě následujících úloh:

- Simulace jízdy podle skutečného jízdního profilu v blízkosti VŠB-TU Ostrava
- Simulace vlastností vozidla CityEL na válcové zkušební výkonu
- Simulace mechatronického modelu pohonné jednotky
- Simulace vícezdrojového systému s energetickým managementem nulté úrovně

## 4.2 Simulace jízdy podle skutečného jízdního profilu v blízkosti VŠB-TU Ostrava

Simulace jízdy vozidla byla provedena dle skutečného jízdního profilu v blízkosti Vysoké školy báňské – technické university v Ostravě Porubě. Start cesty začíná na parkovišti u Sportovní haly a po 250 metrech odbočuje doprava, kde se připojuje na ulici Studentská, ze které cca po 250 metrech odbočuje doleva do mírného stoupání směrem k nemocnici na ulici Dr. Slabiňoudka. Po 250 metrech se cesta stáčí zpět do areálu VŠB, kde po 7% stoupání a celkové vzdálenosti 1340 m končí u budovy posluchárny C. Simulaci jízdní trati se, co nejvíce přiblížila skutečnosti díky aplikaci Google Earth, která poskytuje diagram výškového profilu požadované trati (Obrázek 61).



Obrázek 61: Letecký pohled na vybranou trať a výškový diagram jízdního profilu (49)

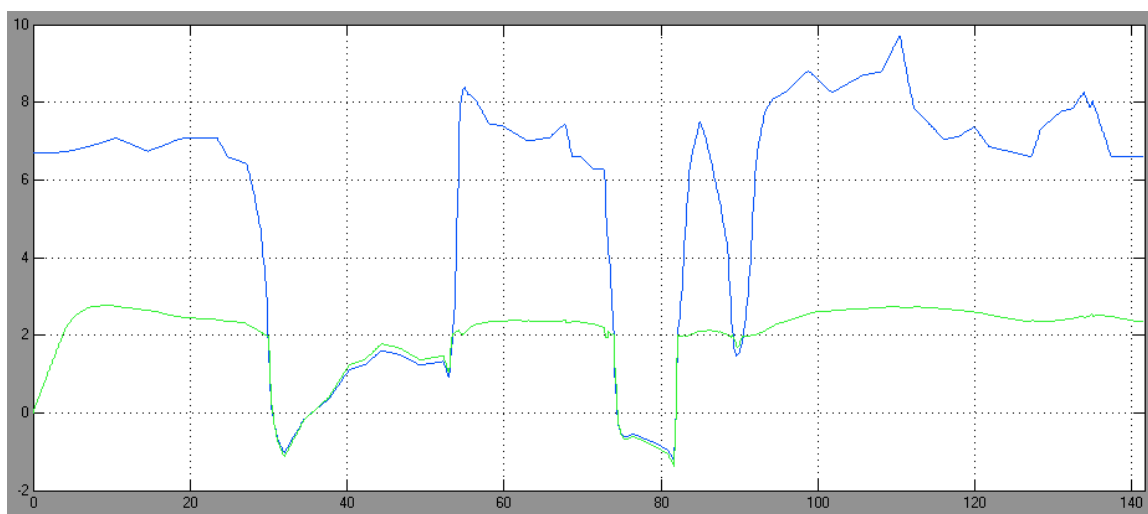
Data výškového profilu byly převedeny programem ScanIt<sup>6</sup> do tabulky dat a přepočtena nadmořská výška na procentuální stoupání v závislosti na zdolané dráze. Takto upravená data byla vložena do simulačního modelu pohony soustavy do *Bloku volby profilu* (Obrázek 22).

Volba profilu dráhy je jedním ze tří vstupních dat do simulace. Uvedme si nyní simulační výsledky na „jízdním profilu VŠB“ při změnách žádaných hodnot rychlosti a zrychlení.

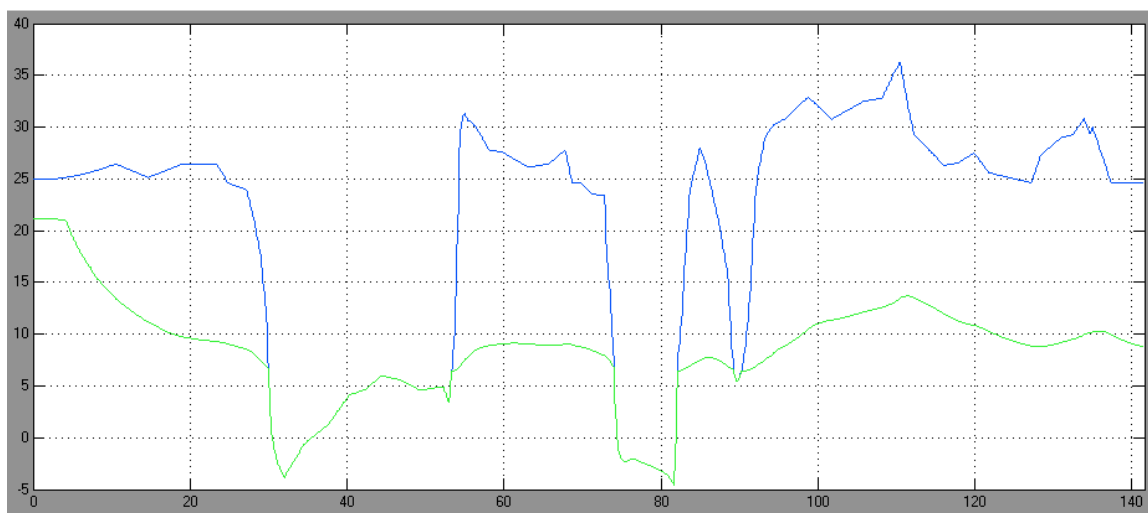
---

<sup>6</sup> Program ScanIt je volně šiřitelný program, který dokáže z grafu ve formě obrázku (stažený z internetu, oskenovaný, vyfocený, apod.) získat data, pro zpracování v dalších programech jako například v tabulkovém kalkulátoru MS Excel. Link pro stažení programu: <http://www.amsterchem.com>

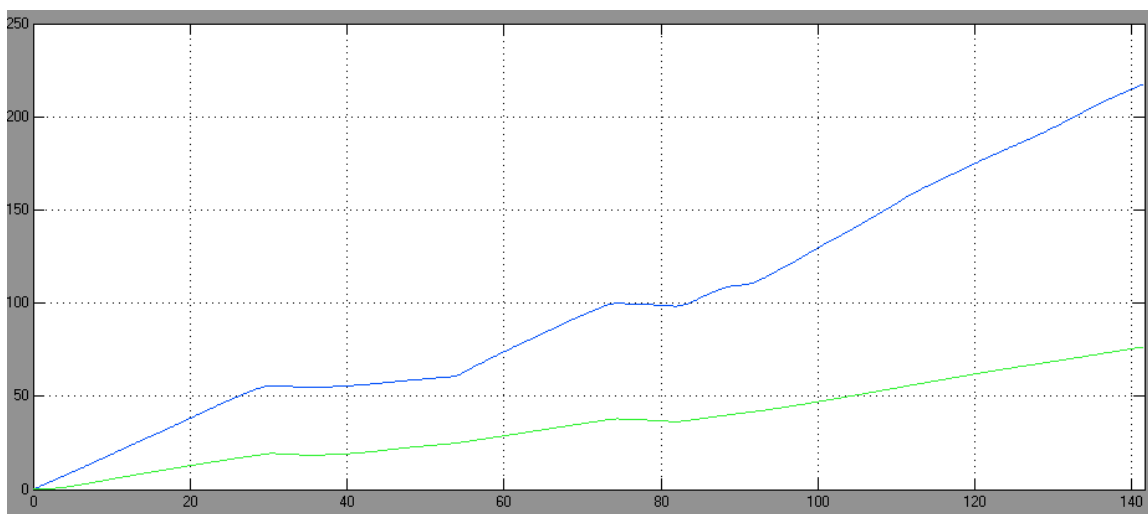
#### 4.2.1 Profil VŠB, žádaná rychlost 40km.h<sup>-1</sup>, maximální zrychlení 1 m.s<sup>-2</sup>



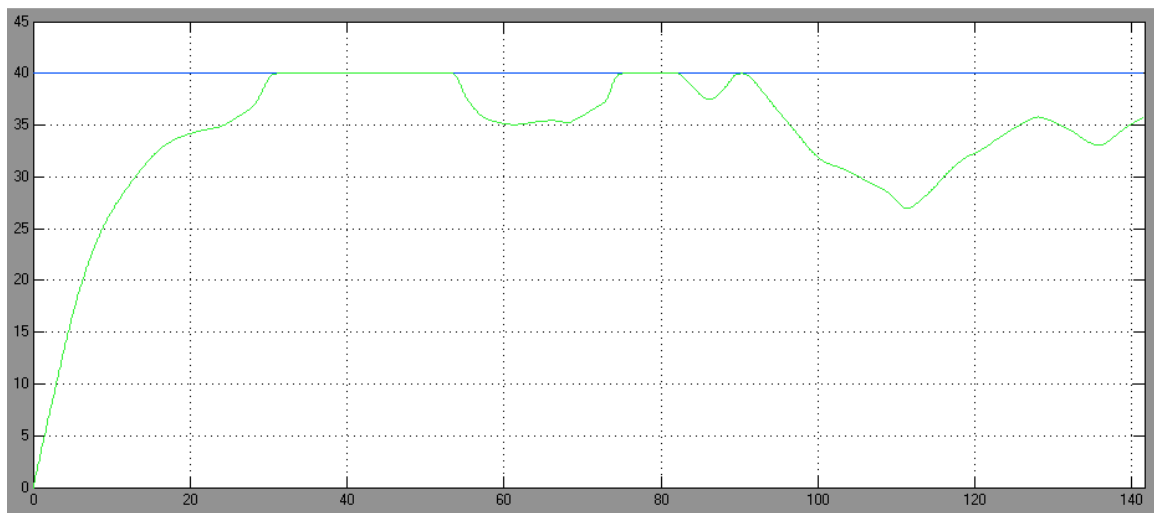
Výkon motoru (kW) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $P = f(t)$



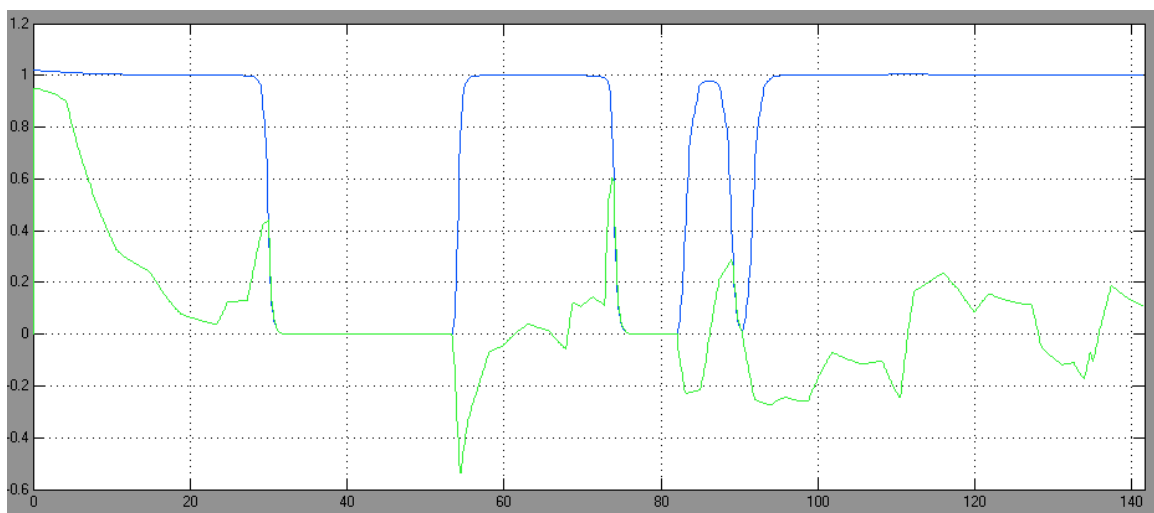
Moment motoru (Nm) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $M = f(t)$



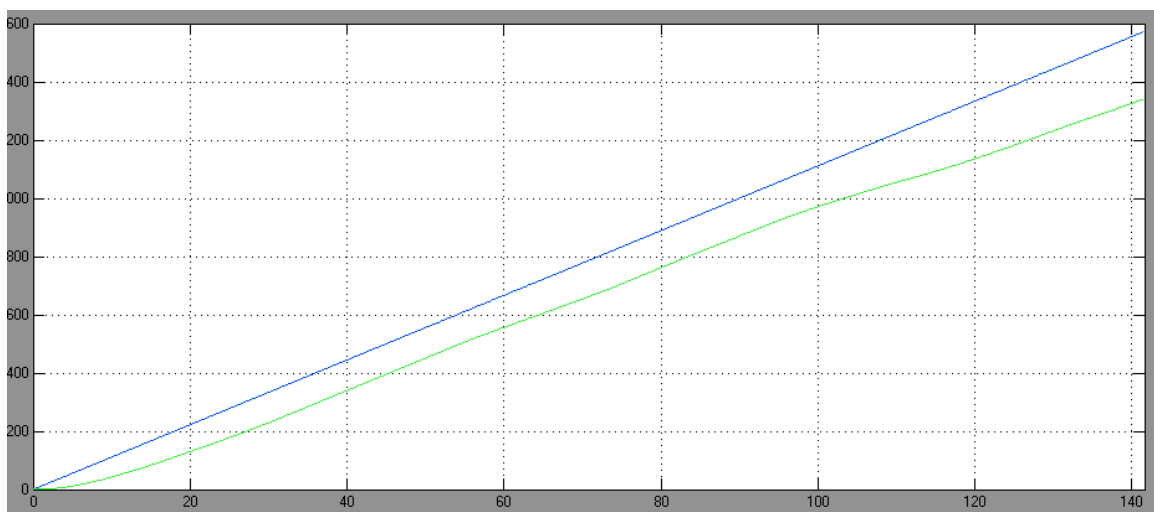
Spotřebovaná energie (Wh) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $E = f(t)$



Rychlost vozidla ( $\text{km.h}^{-1}$ ) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $v = f(t)$

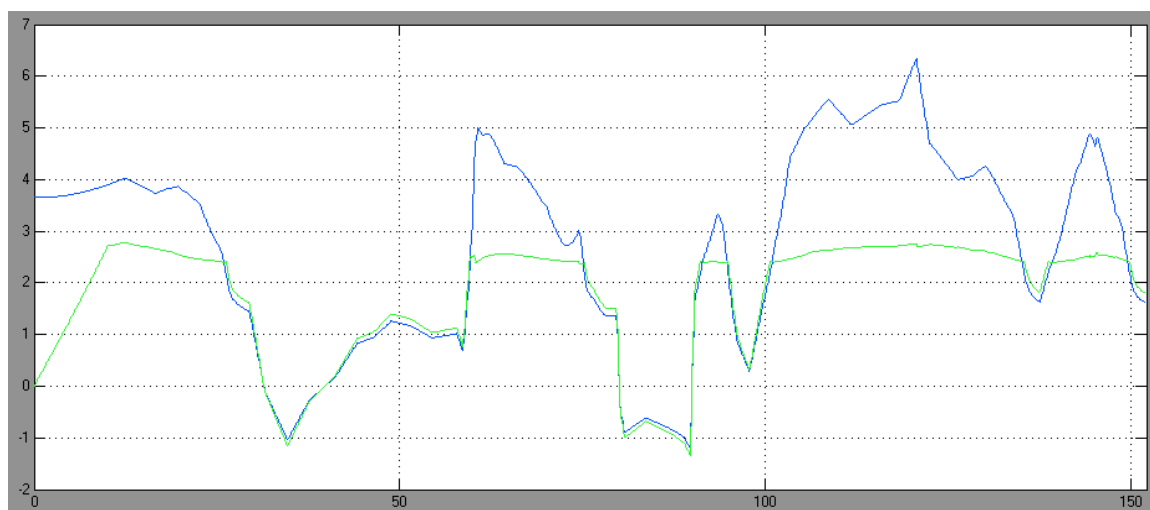


Zrychlení vozidla ( $\text{m/s}^2$ ) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $a = f(t)$

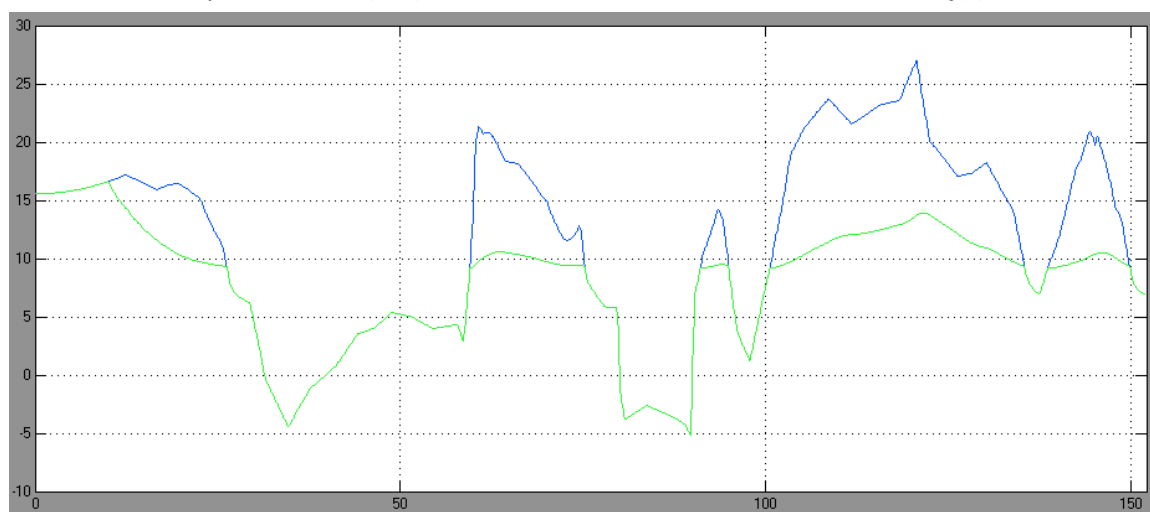


Dráha (m) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $s = f(t)$

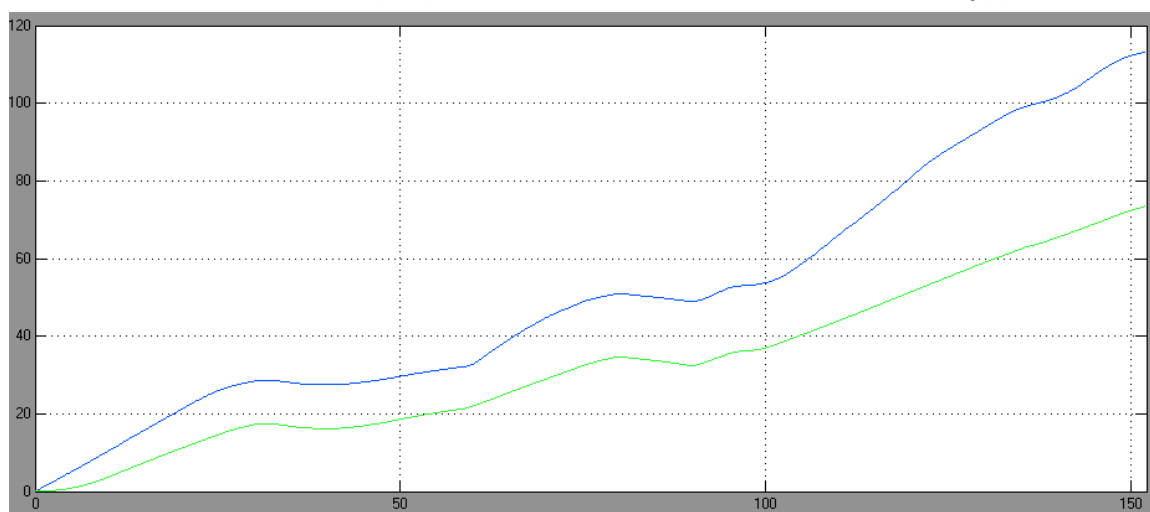
#### 4.2.2 Profil VŠB, žádaná rychlost 35km.h<sup>-1</sup>, maximální zrychlení 0,5 m.s<sup>-2</sup>



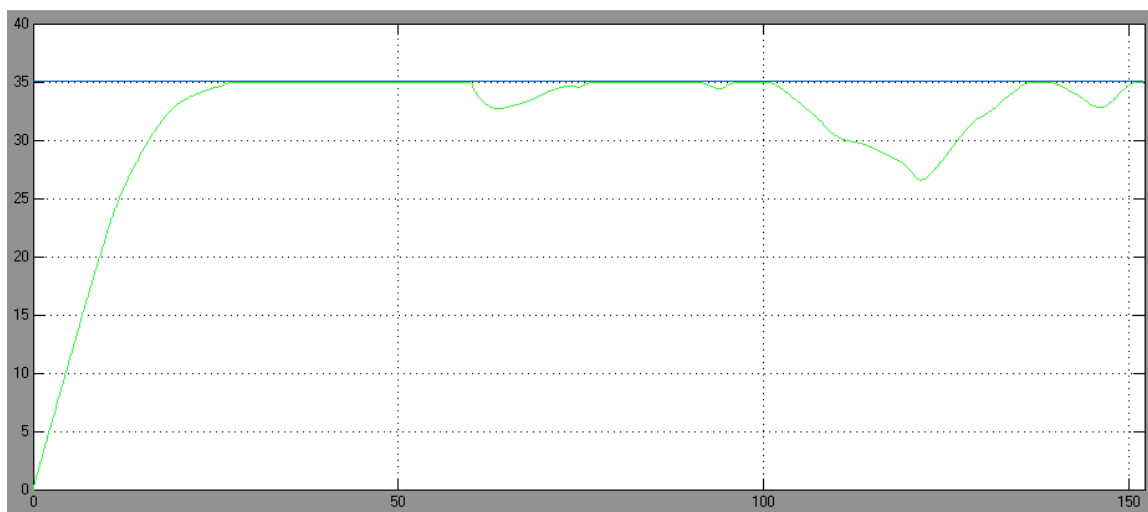
Výkon motoru (kW) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $P = f(t)$



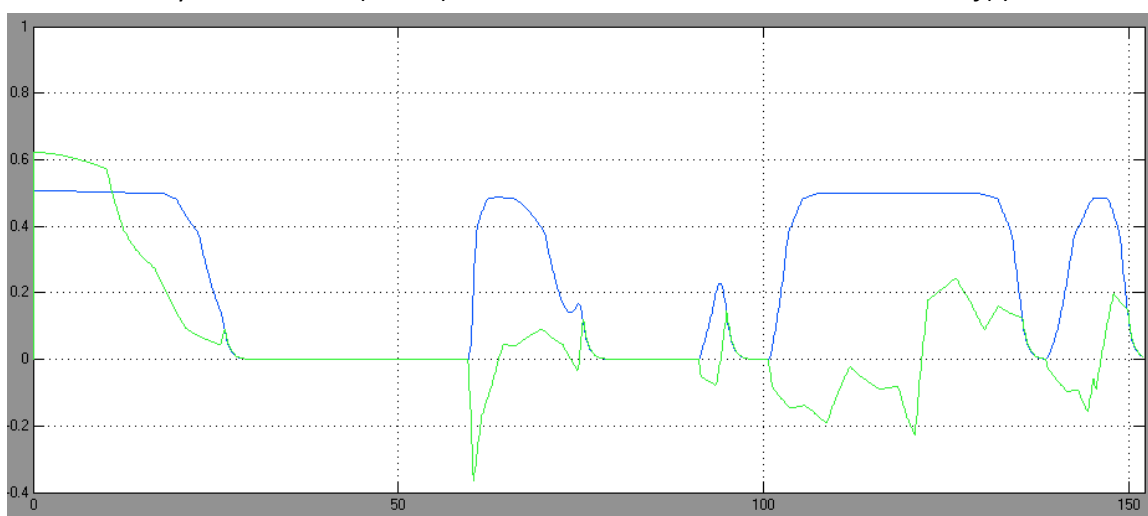
Moment motoru (Nm) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $M = f(t)$



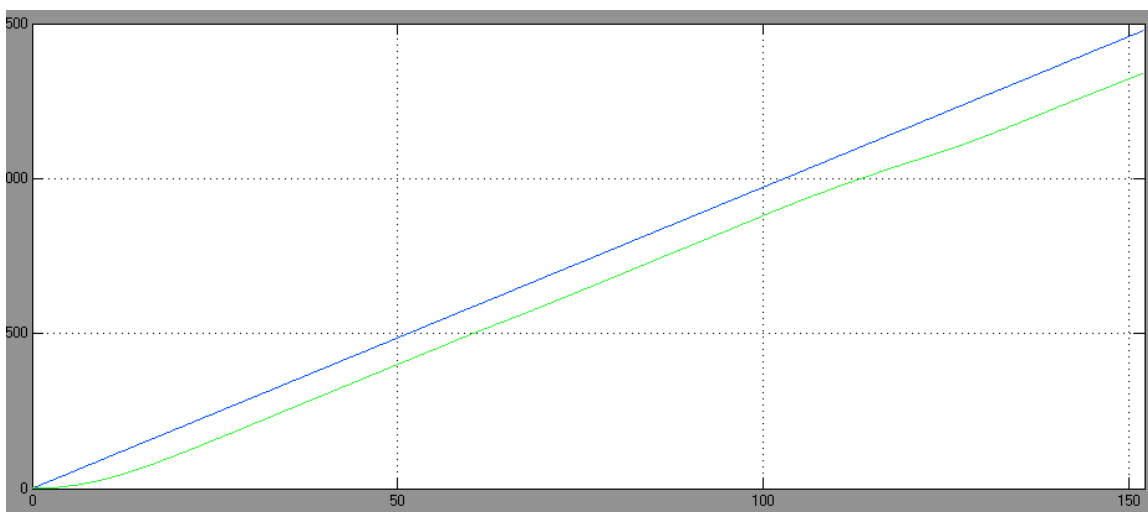
Spotřebovaná energie (Wh) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $E = f(t)$



Rychlost vozidla ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $v = f(t)$



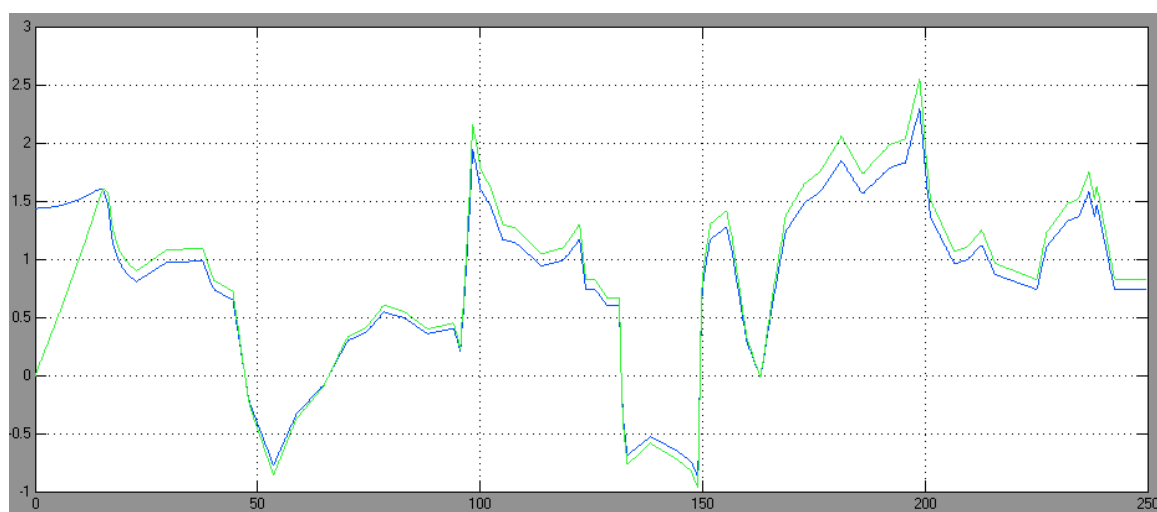
Zrychlení vozidla ( $\text{m}/\text{s}^2$ ) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $a = f(t)$



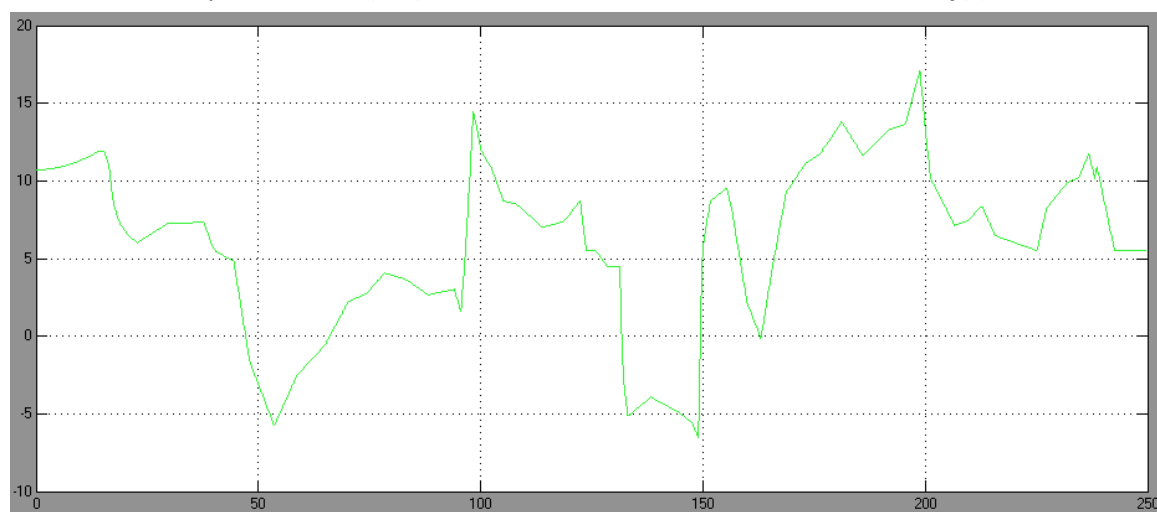
Dráha (m) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $s = f(t)$



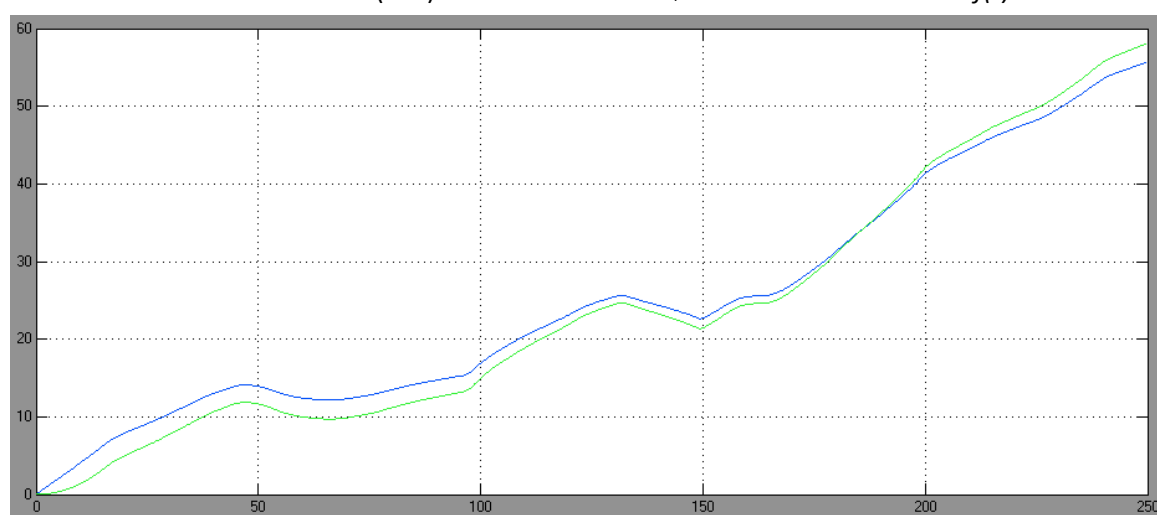
#### 4.2.3 Profil VŠB, žádaná rychlost 20km.h<sup>-1</sup>, maximální zrychlení 0,3m.s<sup>-2</sup>



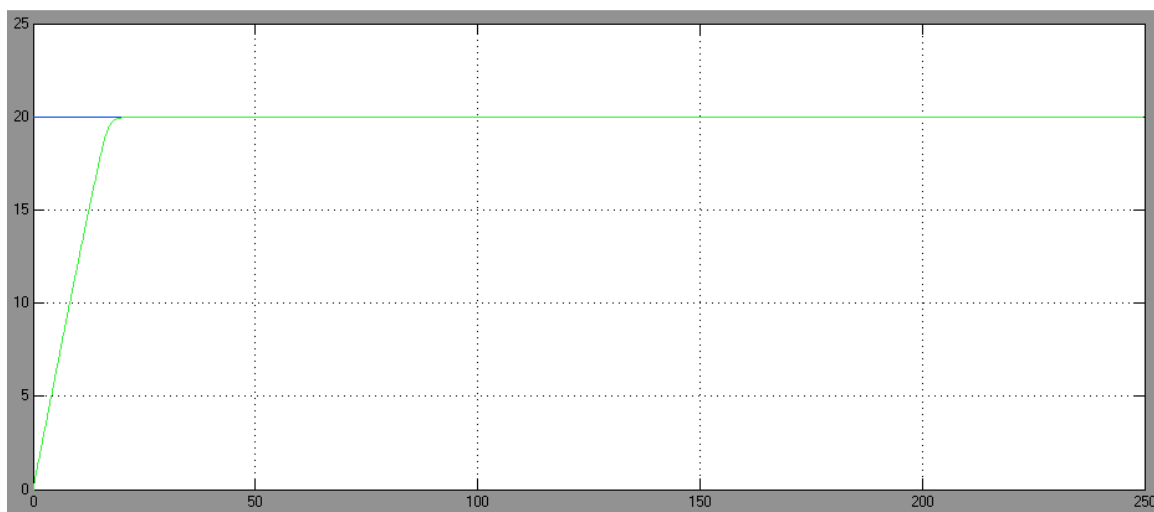
Výkon motoru (kW) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $P = f(t)$



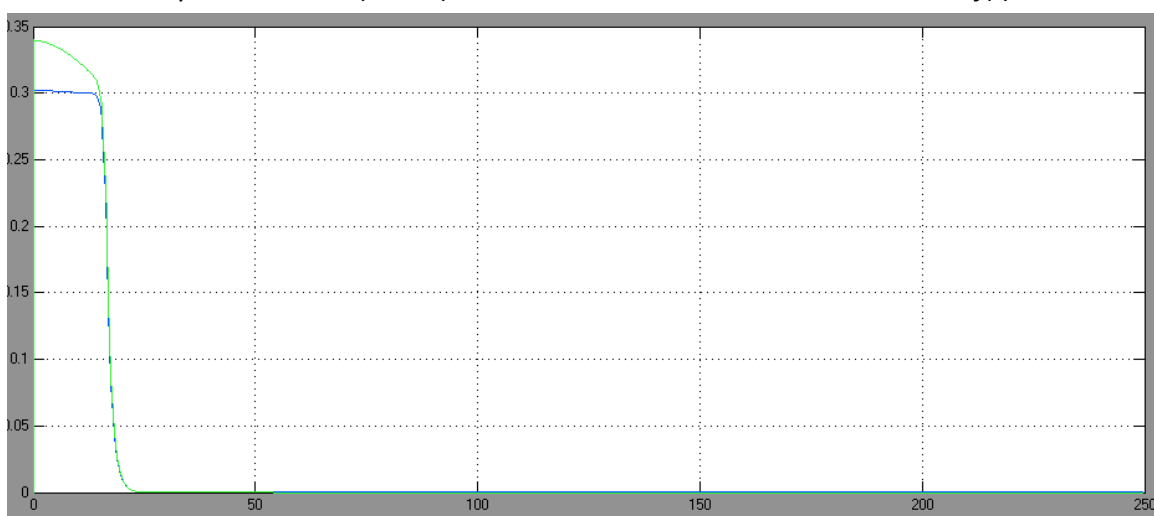
Moment motoru (Nm) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $M = f(t)$



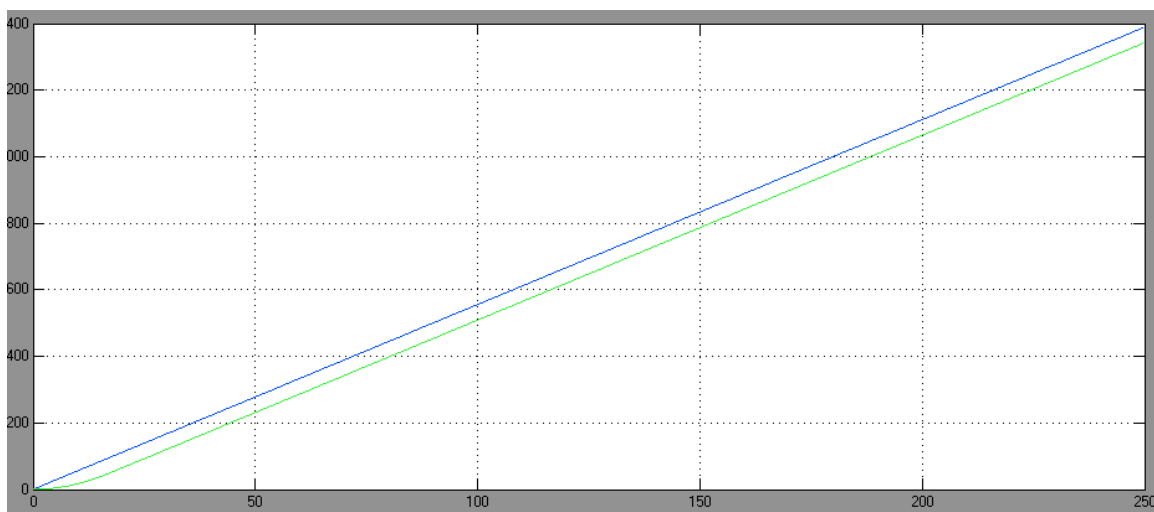
Spotřebovaná energie (Wh) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $E = f(t)$



Rychlost vozidla ( $\text{km.h}^{-1}$ ) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $v = f(t)$



Zrychlení vozidla ( $\text{m/s}^2$ ) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $a = f(t)$



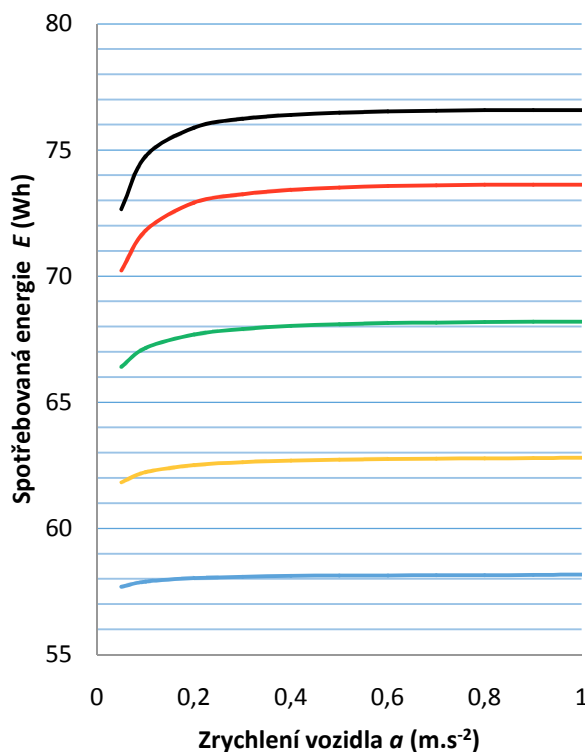
Dráha (m) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $s = f(t)$

#### 4.2.4 Profil VŠB – shrnutí výsledků

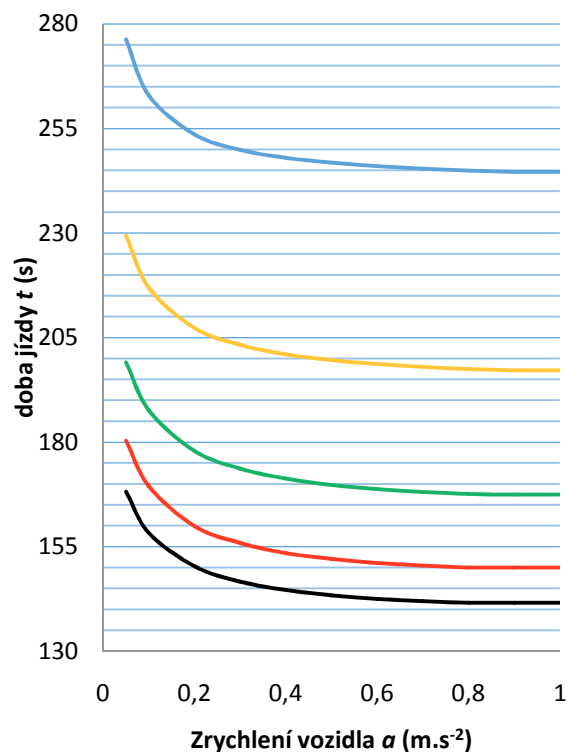
Tabulka 6: Vlastnosti vozidla při variabilní žádané rychlosti a zrychlení

s = 1340m	v* = 20 km.h <sup>-1</sup>			v* = 25 km.h <sup>-1</sup>			v* = 30 km.h <sup>-1</sup>			v* = 35 km.h <sup>-1</sup>			v* = 40 km.h <sup>-1</sup>		
a (m/s <sup>2</sup> )	t (s)	E (Wh)	V <sub>AVG</sub> (km.h <sup>-1</sup> )	t (s)	E (Wh)	V <sub>AVG</sub> (km.h <sup>-1</sup> )	t (s)	E (Wh)	V <sub>AVG</sub> (km.h <sup>-1</sup> )	t (s)	E (Wh)	V <sub>AVG</sub> (km.h <sup>-1</sup> )	t (s)	E (Wh)	V <sub>AVG</sub> (km.h <sup>-1</sup> )
0,05	276,3	57,69	17,48	229,41	61,83	21,06	199,1	66,41	24,27	180,3	70,22	26,8	168,2	72,65	28,73
0,1	262,9	57,9	18,38	216,9	62,23	22,27	187,6	67,15	25,76	169,5	71,81	28,51	158,3	74,75	30,51
0,2	253,6	58,03	19,05	207,3	62,51	23,3	177,9	67,69	27,15	159,9	72,91	30,21	150,3	75,89	32,15
0,3	249,9	58,09	19,33	203,3	62,63	23,77	173,7	67,91	27,82	155,9	73,25	31	146,7	76,24	32,94
0,4	248	58,12	19,48	201	62,69	24,03	171,3	68,03	28,21	153,5	73,42	31,47	144,7	76,39	33,39
0,5	246,8	58,13	19,58	199,6	62,73	24,2	169,8	68,1	28,45	152,1	73,51	31,76	143,4	76,48	33,69
0,6	246	58,14	19,64	198,7	62,75	24,32	168,8	68,14	28,62	151,1	73,57	31,96	142,5	76,53	33,89
0,7	245,4	58,15	19,69	198	62,77	24,4	168,1	68,16	28,74	150,5	73,6	32,1	142	76,56	34,03
0,8	244,9	58,15	19,73	197,5	62,78	24,46	167,6	68,18	28,82	150	73,62	32,2	141,6	76,58	34,11
0,9	244,6	58,16	19,75	197,2	62,79	24,5	167,5	68,19	28,85	150	73,62	32,21	141,6	76,58	34,12
1	244,6	58,17	19,75	197,2	62,81	24,5	167,5	68,19	28,85	150	73,62	32,21	141,6	76,58	34,12

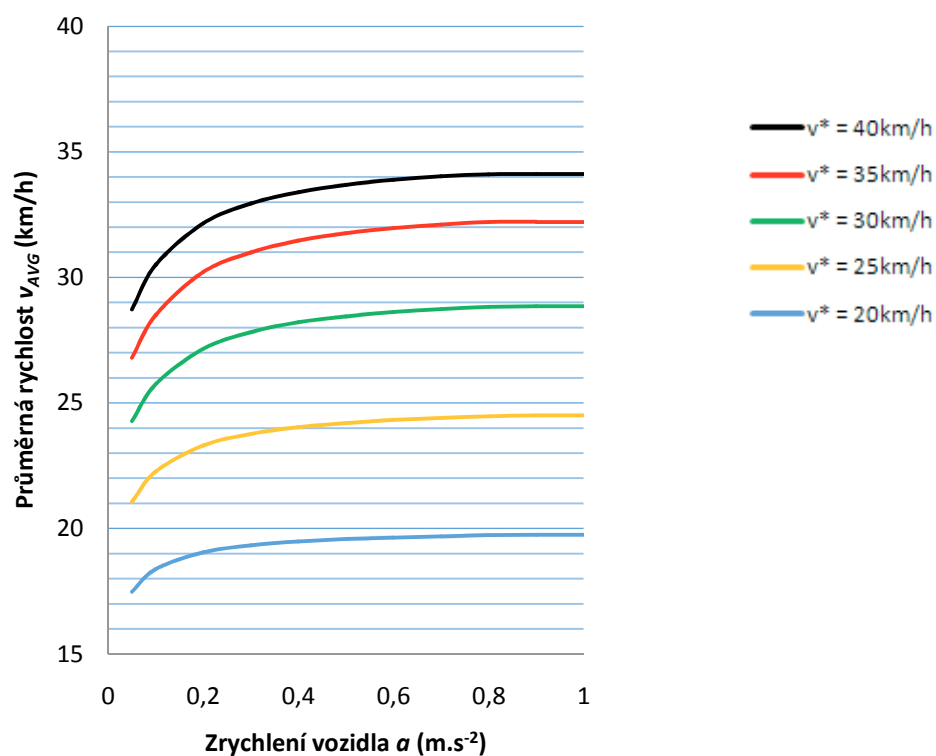
Simulační výsledky vozidla jedoucího po výškovém profilu o celkové délce 1340 m shrnuje tabulka 6. Byly provedeny simulace pro žádaná zrychlení v rozsahu 0,05 až 1 m.s<sup>-2</sup> a pro pět žádaných rychlostí v rozsahu 20 – 40 km.h<sup>-1</sup>. Pro každé z nich byla odečítána doba projetí jízdního profilu, spotřebovaná energie a průměrná rychlost.



Obrázek 63: Závislost spotřebované energie na žádaném zrychlení vozidla  $W = f(a) @ v^*$



Obrázek 64: Závislost doby jízdy na žádaném zrychlení vozidla  $W = f(a) @ v^*$

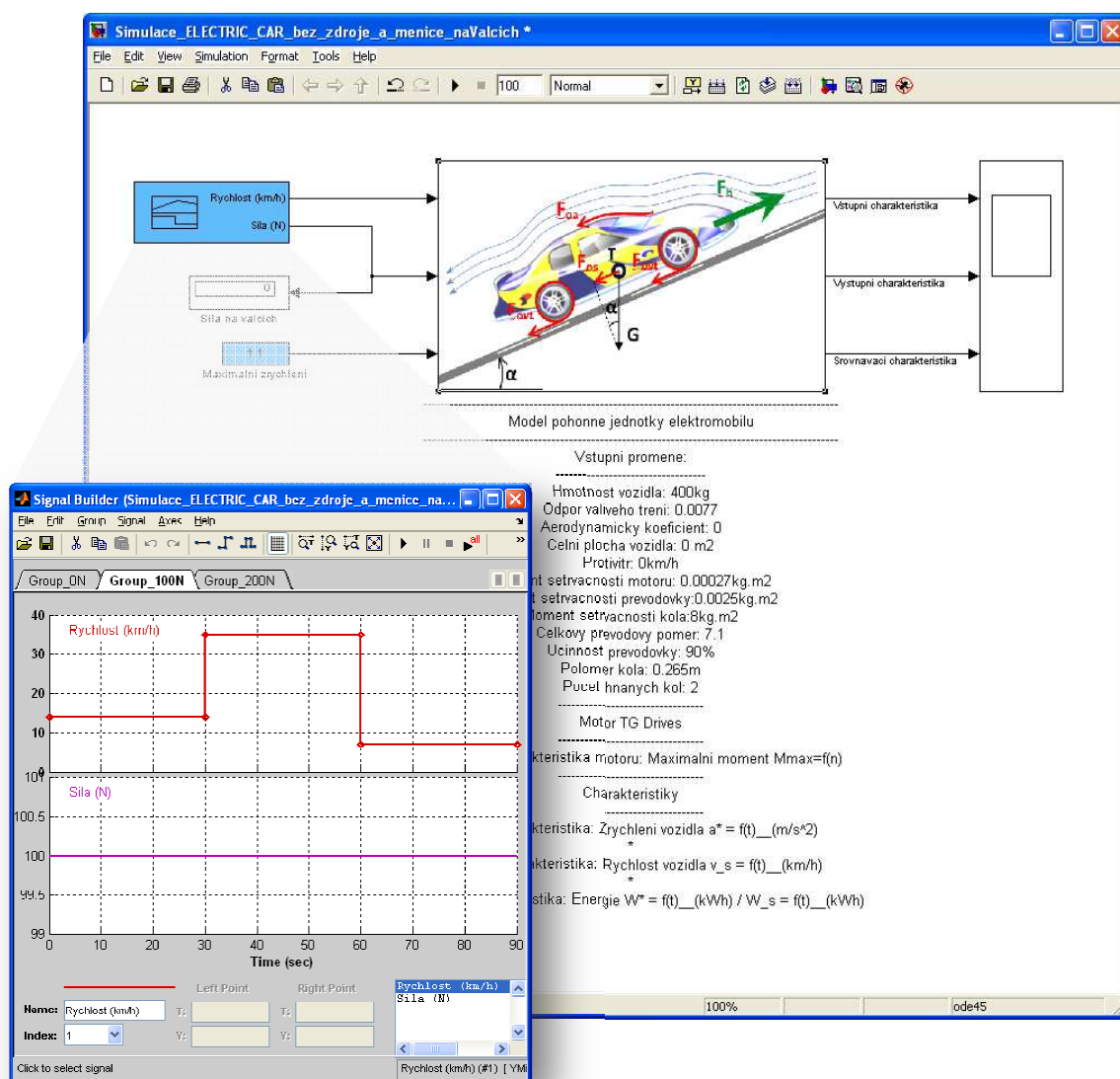


Obrázek 62: Závislost průměrné rychlosti na zrychlení vozidla  $W = f(a) @ v^*$

Následující obrázky (Obrázek 62, 63 a 64) graficky popisují závěry z tabulky 6. Se vzrůstající žádanou rychlostí a zrychlením roste spotřebovaná energie a klesá doba jízdy a průměrná rychlost jelikož motor již při vyšších žádaných rychlostech nedovede dodat potřebný výkon.

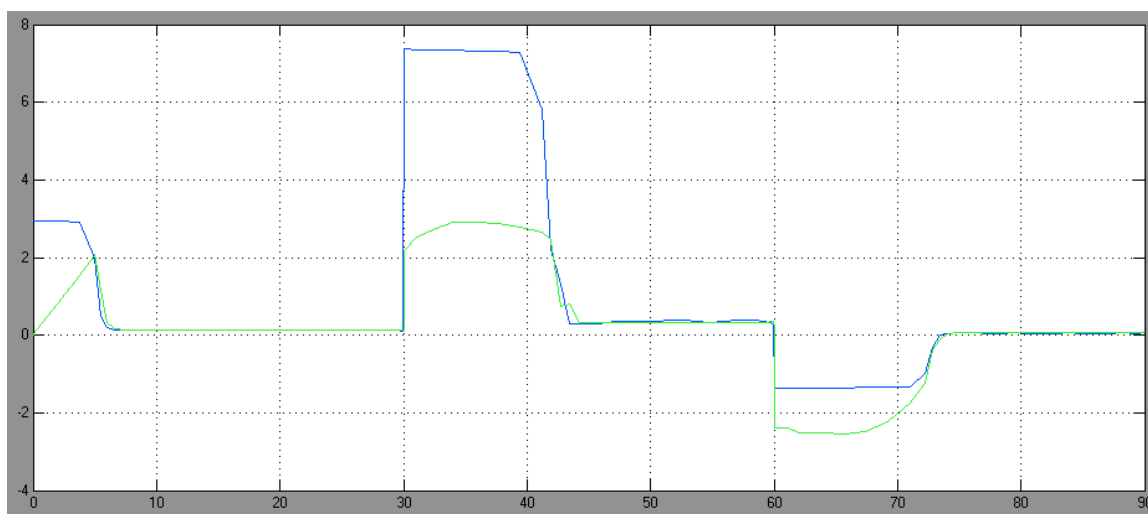
### 4.3 Simulace vlastností vozidla CityEL na válcové zkušební výkonu

Následující úloha (Obrázek 65) popisuje vlastnosti pohonné soustavy na válcové zkušební výkonu. V porovnání s modelem v předchozím odstavci, v němž byl zadán tvar jízdního profilu, a tedy ujetá vzdálenost byla konstantou a čas jízdy byl proměnou závisící na rychlosti a zrychlení vozidla, jsou v tomto simulačním modelu konstantní časové úseky a ujetá vzdálenost závisí na rychlosti a zrychlení vozidla a odporové síle válcové zkušebny výkonu.

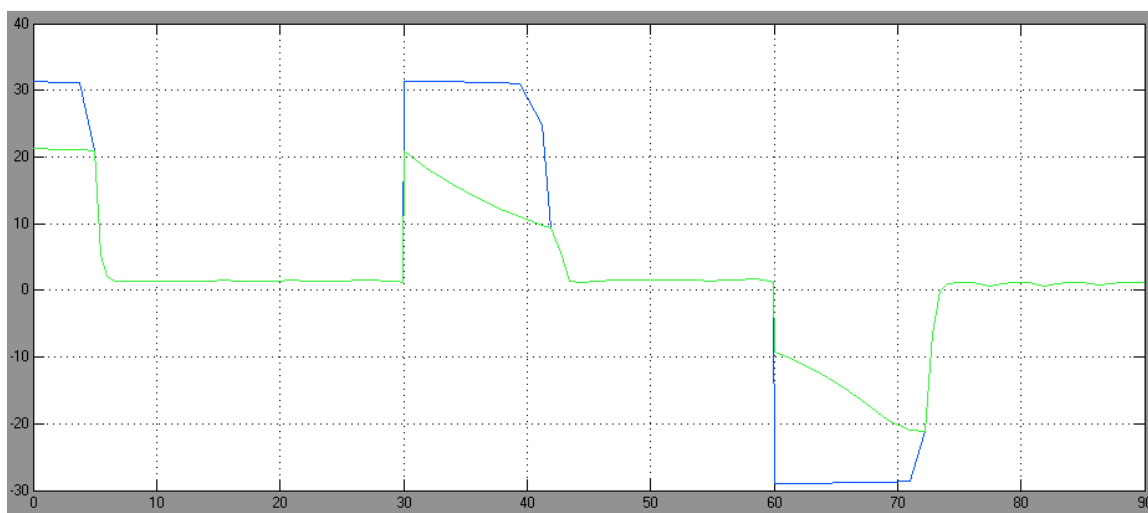


Obrázek 65: Nastavení modelu pro simulování vlastností vozidla CityEL na válcové zkušební výkonu

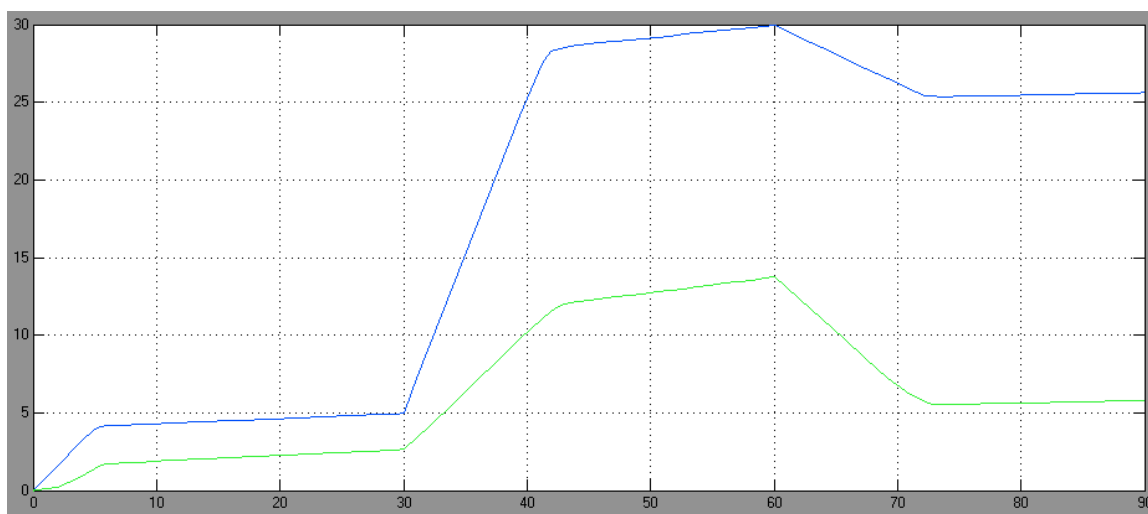
#### 4.3.1 Síla válcové brzdy 0N, maximální zrychlení $1,1\text{m.s}^{-2}$



Výkon motoru (kW) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $P = f(t)$

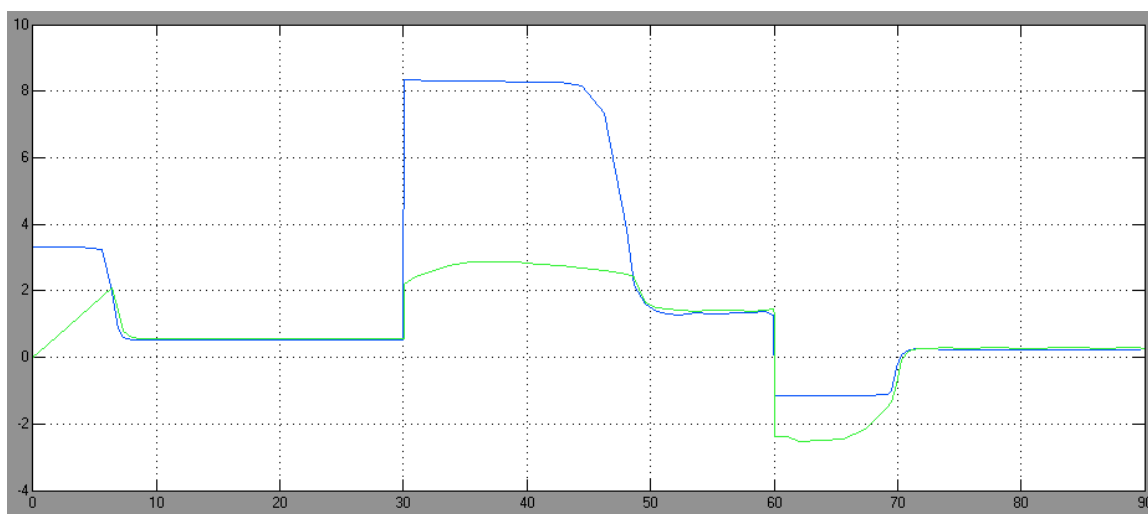


Moment motoru (Nm) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $M = f(t)$

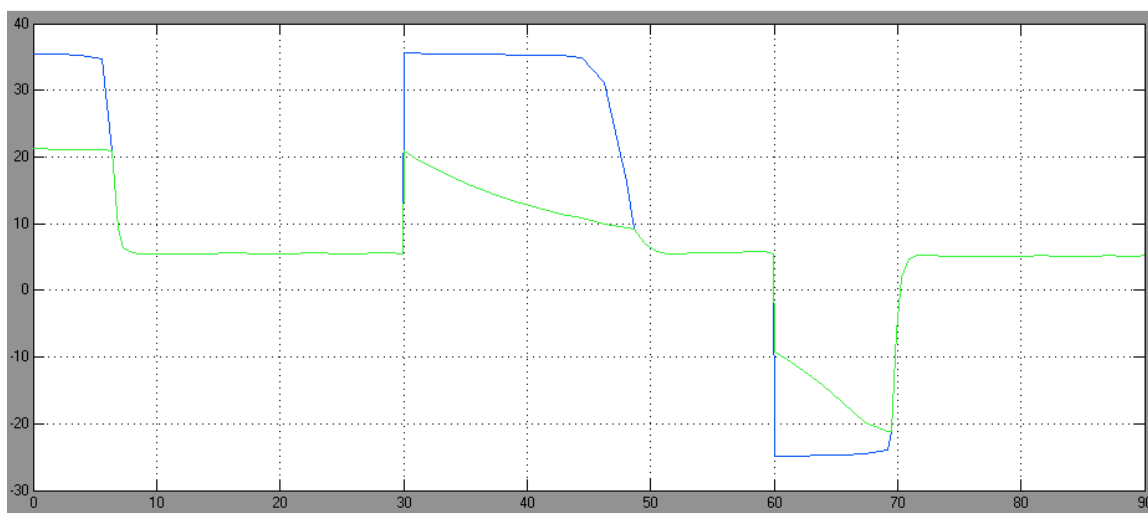


Spotřebovaná energie (Wh) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $E = f(t)$

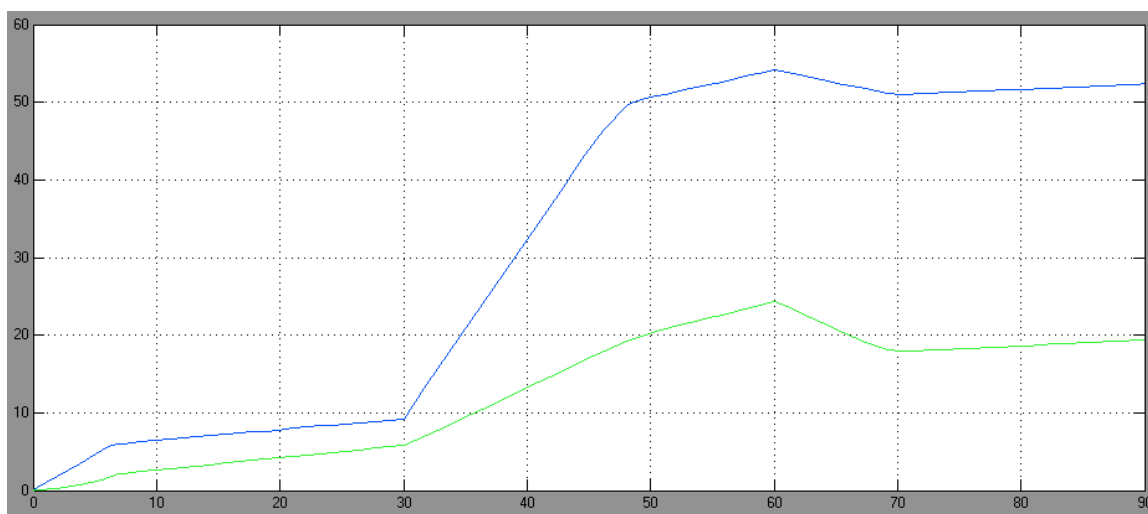
#### 4.3.2 Síla válcové brzdy 100N, maximální zrychlení $1,1\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$



Výkon motoru (kW) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $P = f(t)$

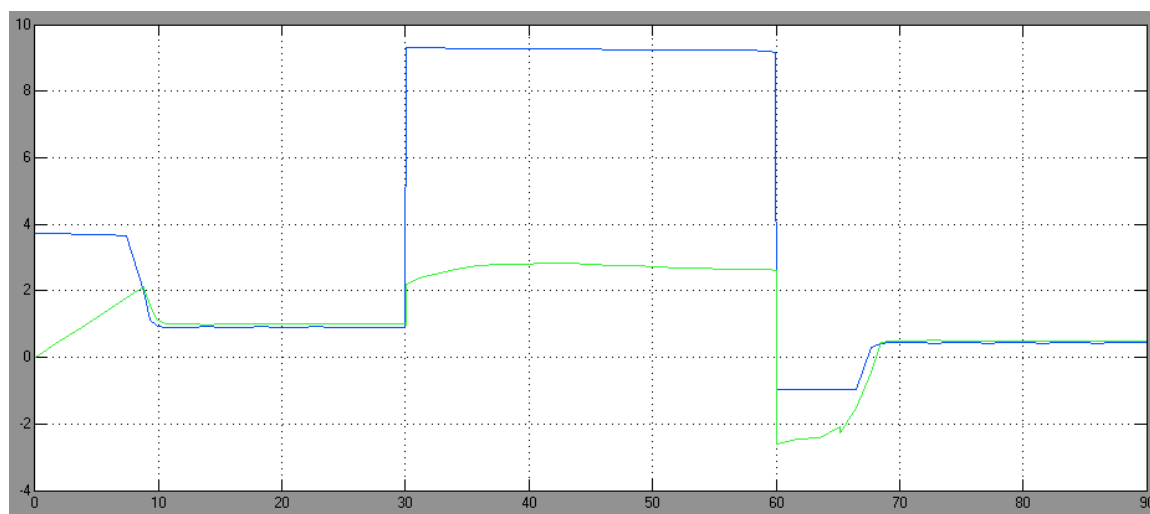


Moment motoru (Nm) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $M = f(t)$

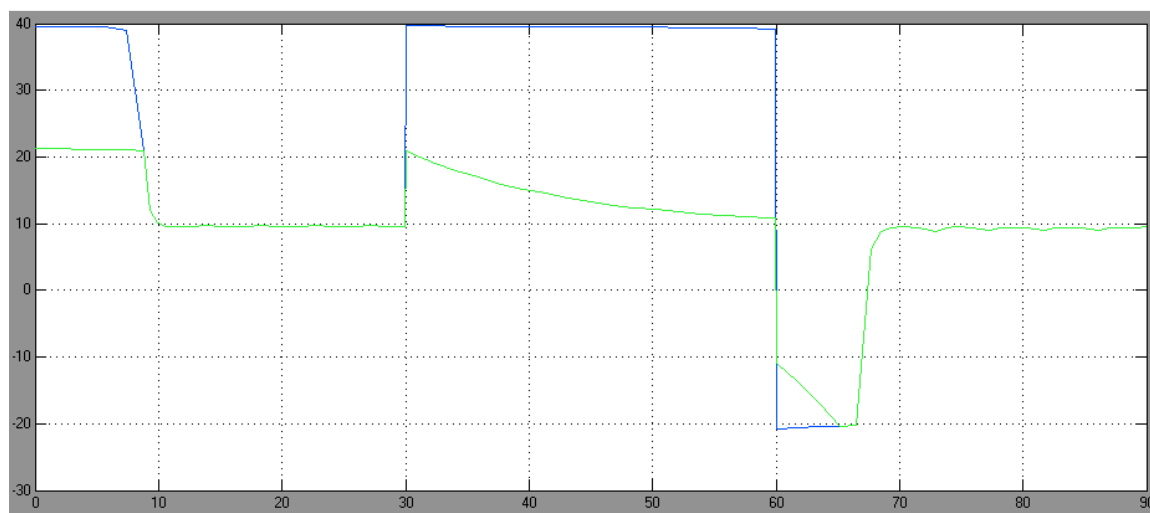


Spotřebovaná energie (Wh) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $E = f(t)$

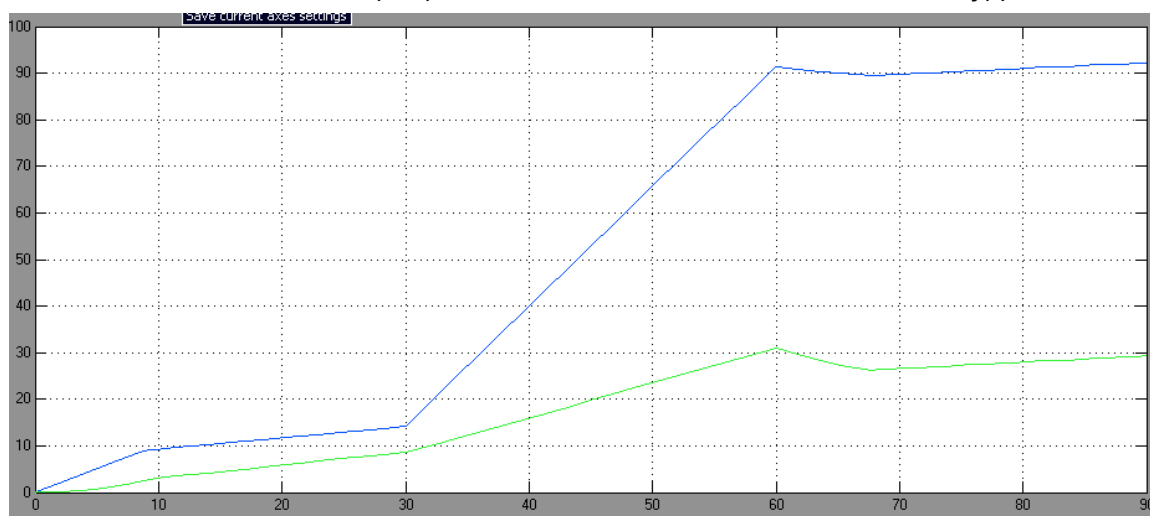
### 4.3.3 Síla válcové brzdy 200N, maximální zrychlení $1,1\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$



Výkon motoru (kW) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $P = f(t)$



Moment motoru (Nm) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $M = f(t)$

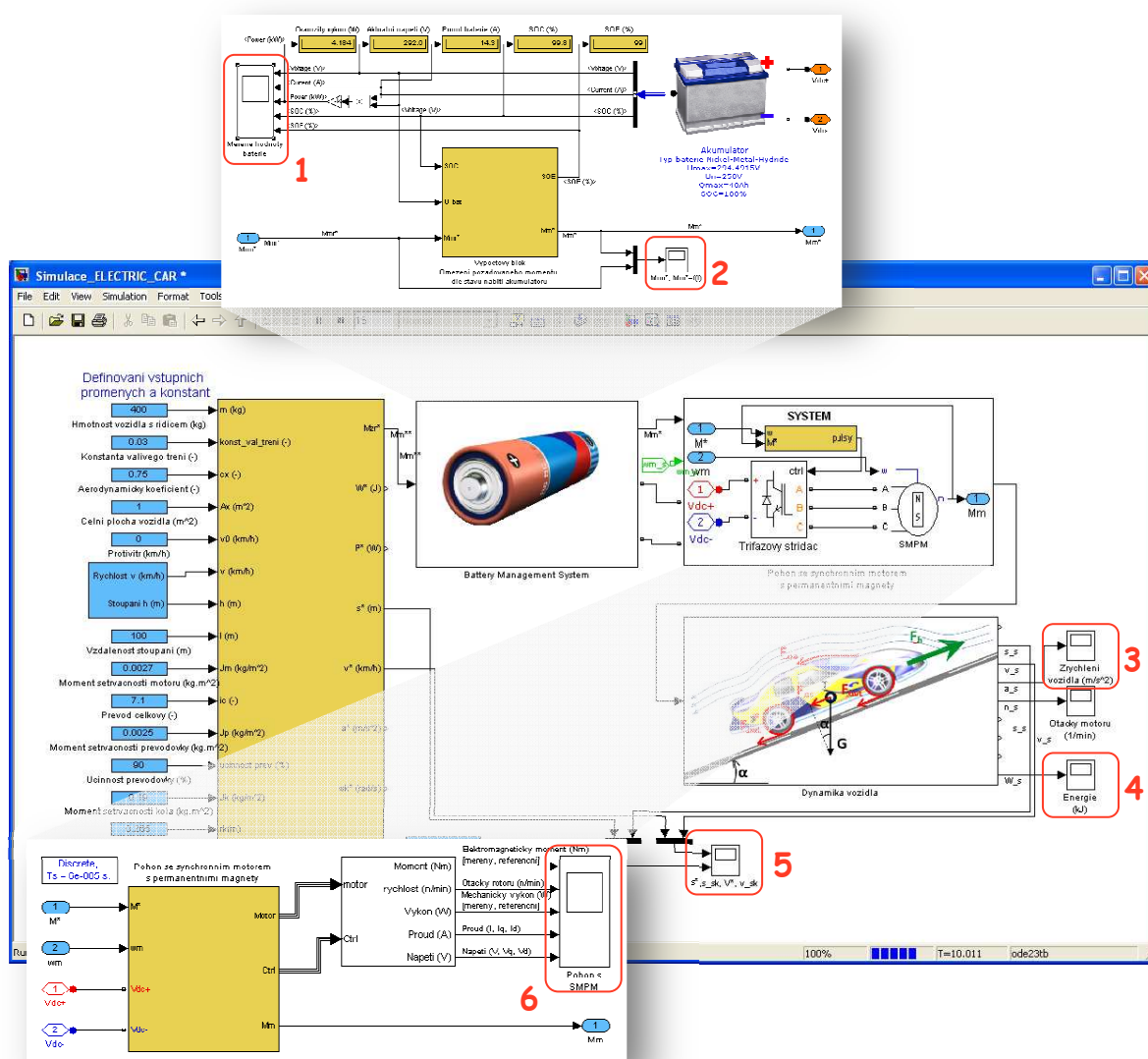


Spotřebovaná energie (Wh) – modrá – žádaná hodnota, zelená – skutečná hodnota  $E = f(t)$

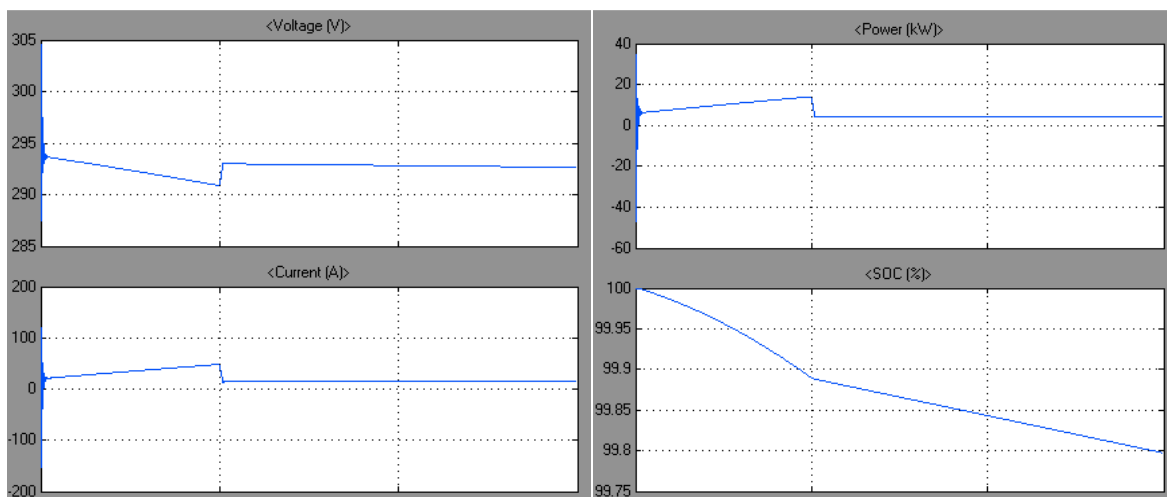


## 4.4 Simulace mechatronického modelu pohonné jednotky

Následující simulace je oproti předchozím dvěma modelům doplněna o bloky napájecího zdroje – akumulátorové baterie a bloku pohonu – polovodičového střídače a vektorově řízeného SMPM. Díky těmto blokům, je možné sledovat pohonnou soustavu jako komplexní mechatronický systém. Demonstrace funkce simulační úlohy je provedena pro následující vstupní parametry: parametry podvozku a rozvodovky dle vlastností vozidla CityEL (*kap. 4.1.1*), žádaná rychlost má průběh lineárního nárůstu rychlosti z 0 na 30 km.h<sup>-1</sup> za dobu 5 s a dále 10 s udržování konstantní rychlosti, při stálém stoupání 6%, napájecí akumulátor typu NiMH ( $U_n = 250$  V,  $Q = 40$  Ah, SOC = 100%), SMPM motor ( $U_{DC} = 300$  VDC,  $n_n = 4500$  min<sup>-1</sup>,  $M_n = 6$  Nm,  $R_s = 0,62$ ,  $L_d = L_q = 2,075$  mH,  $p = 4$ ). Simulační výsledky popsány na následujících stránkách jsou vybrány dle měřicích bodů znázorněných na obrázku 66.

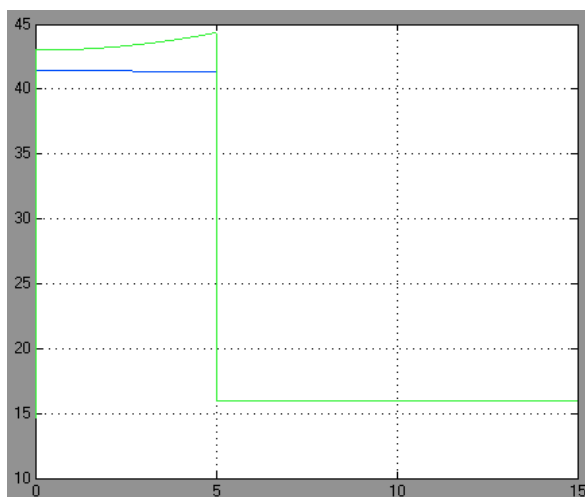


Obrázek 66: Simulační model pohonné jednotky s vyznačenými sledovanými body

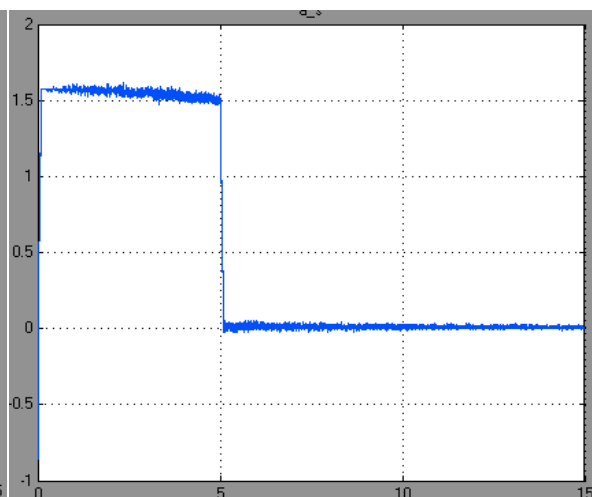


**1** Napětí (V) (horní) a proud (A) (spodní)  
akumulátoru (xosa = 5s/díl)

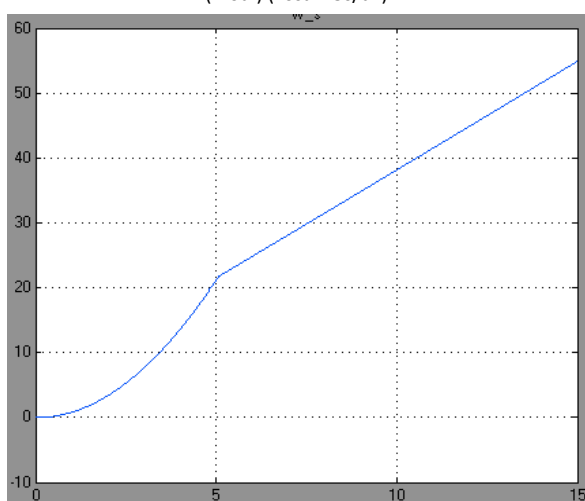
**1** Výkon (kW) (horní) a SOC (%) (spodní)  
akumulátoru (xosa = 5s/díl)



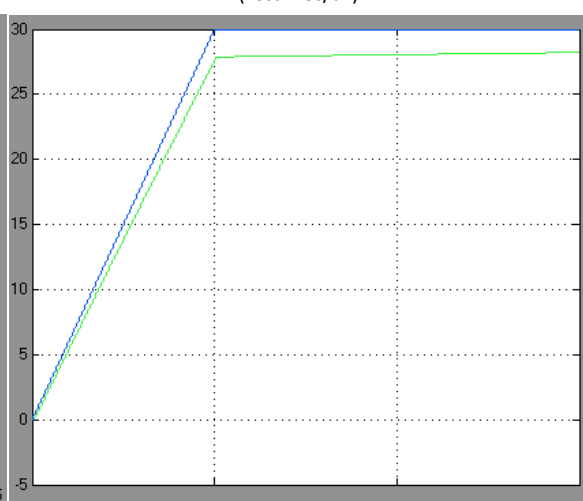
**2** Žádaný (Nm) (zel.) a omezený moment (Nm)  
(mod.) (xosa = 5s/díl)



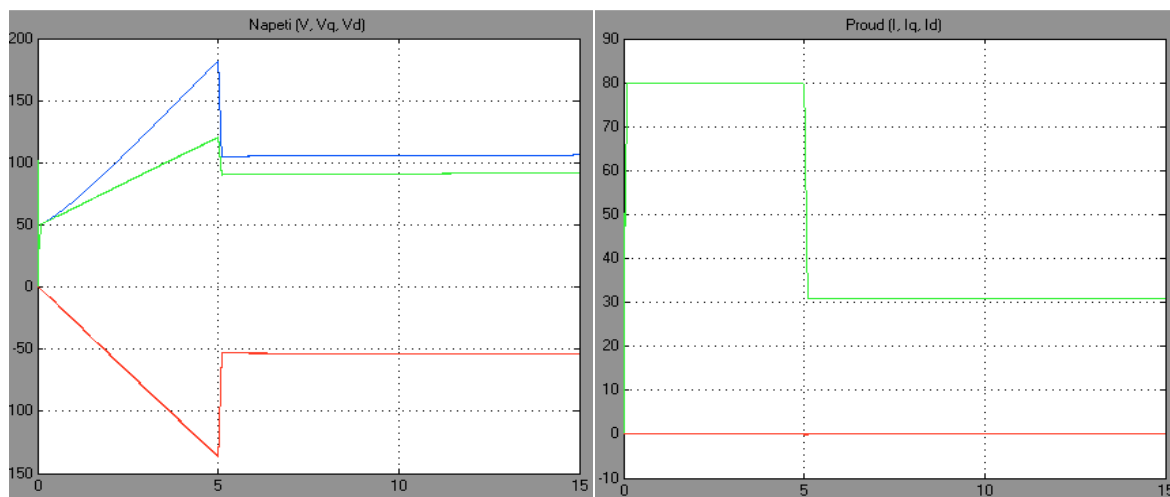
**3** Zrychlení vozidla ( $\text{m.s}^{-2}$ ) modrá–skutečná hodnota  
(xosa = 5s/díl)



**4** Spotřebovaná energie (kJ) (xosa = 5s/díl)



**5** Rychlost vozidla ( $\text{km.h}^{-1}$ ) modrá–žádaná., zelená. –  
skutečná (xosa = 5s/díl)

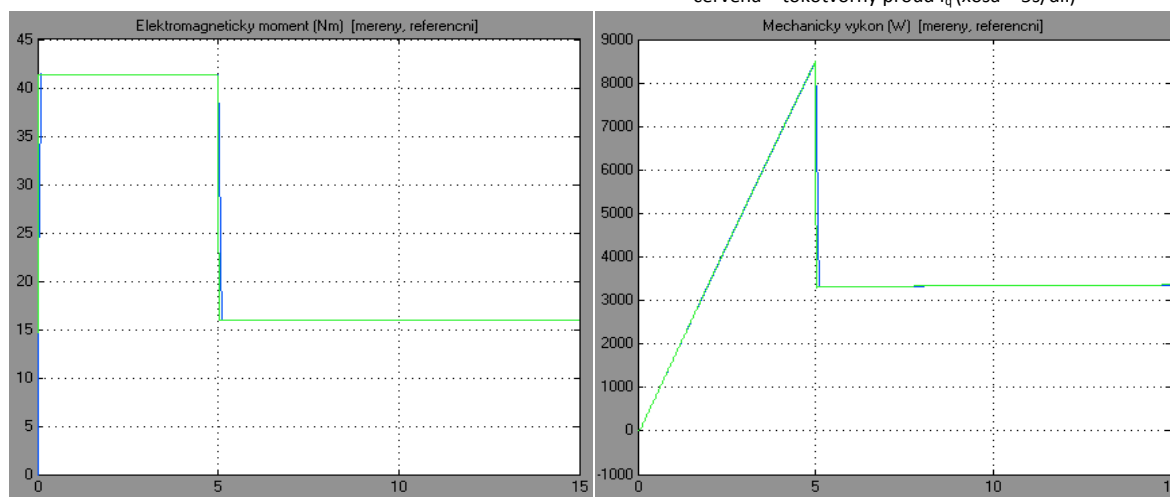


## 6 Vnitřní napětí SMPM (V)

zelená –  $U_q$ , červená –  $U_d$ , modrá –  $U$  (xosa = 5s/díl)

## 6 Proudů SMPM (A)

zelená, modrá – celkový  $I$  a momentotvorný  $I_q$  proud,  
červená – tokotvorný proud  $I_d$  (xosa = 5s/díl)



## 6 Elektromagnetický moment SMPM (Nm)

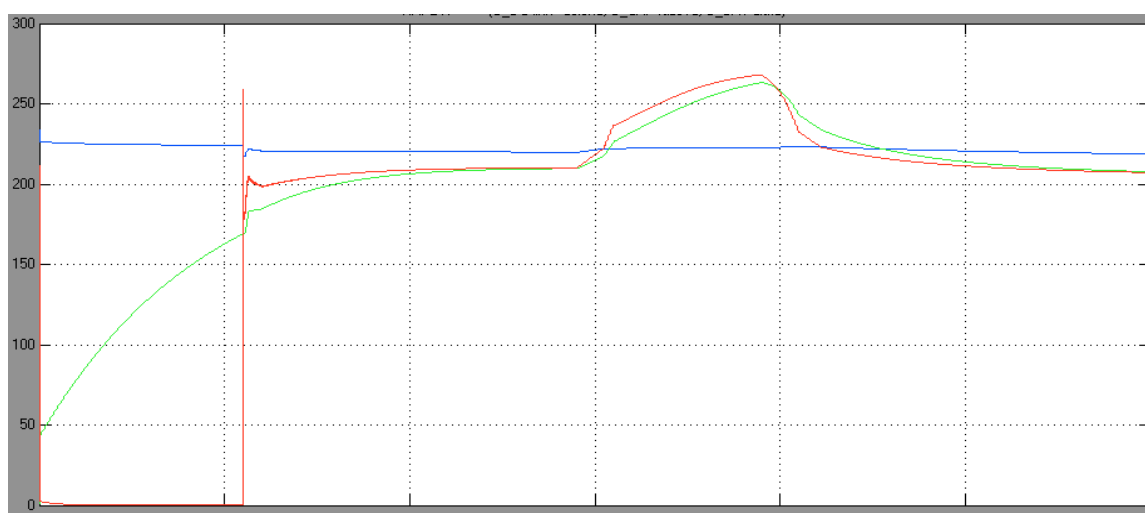
zelená – žádaná hodnota, modrá – skutečná hodnota  
(xosa = 5s/díl)

## 6 Mechanický výkon SMPM (W)

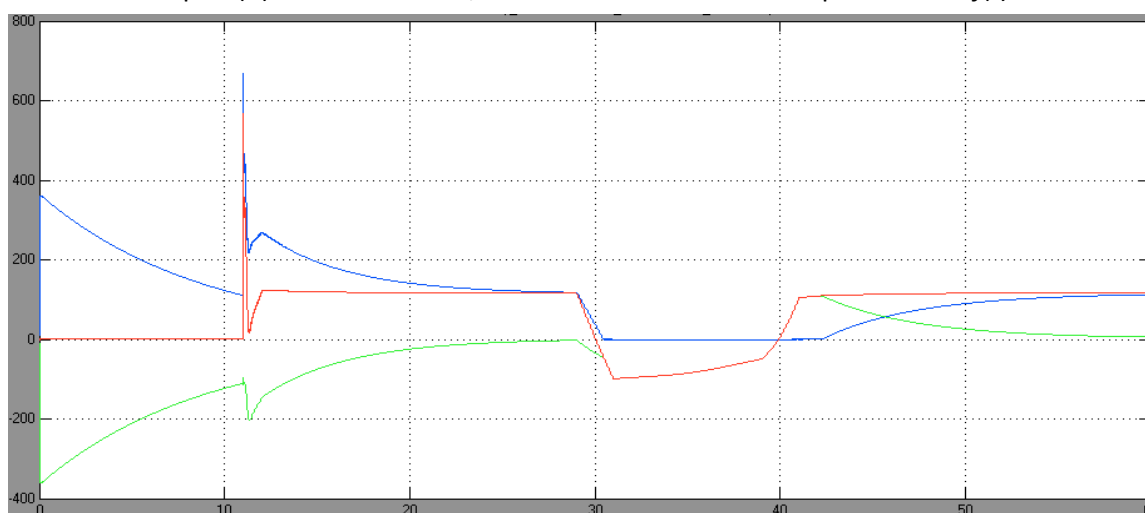
zelená – žádaná hodnota, modrá – skutečná hodnota  
(xosa = 5s/díl)

## 4.5 Simulace vícezdrojového systému s energetickým managementem nulté úrovně

Simulační úloha řeší spolupráci dvou napájecích zdrojů akumulátorové a ultrakapacitorové baterie, které pracují do společné zátěže představující stejnosměrný motor. Simulace (Obrázek 67) začíná 11 s, kdy motor stojí a přednabíjí se ultrakapacitorová baterie. V následujícím sedmnácti sekundovém intervalu je stroj provozován jako motoru při konstantních otáčkách, kdy je energie dodávána z akumulátorové baterie. Dále dochází k otočení smyslu žádaného momentu, stroj se stává na 8 s generátorem, proud akumulátorem je nulový a teče pouze do ultrakapacitorové baterie. V čase 41 s se moment stroje opět obrací do motorické oblasti a proud je po dobu 1,25 s dodáván pouze z ultrakapacitoru a dále cca 18 s klesá, přičemž stoupá odběr proudu z akumulátoru.



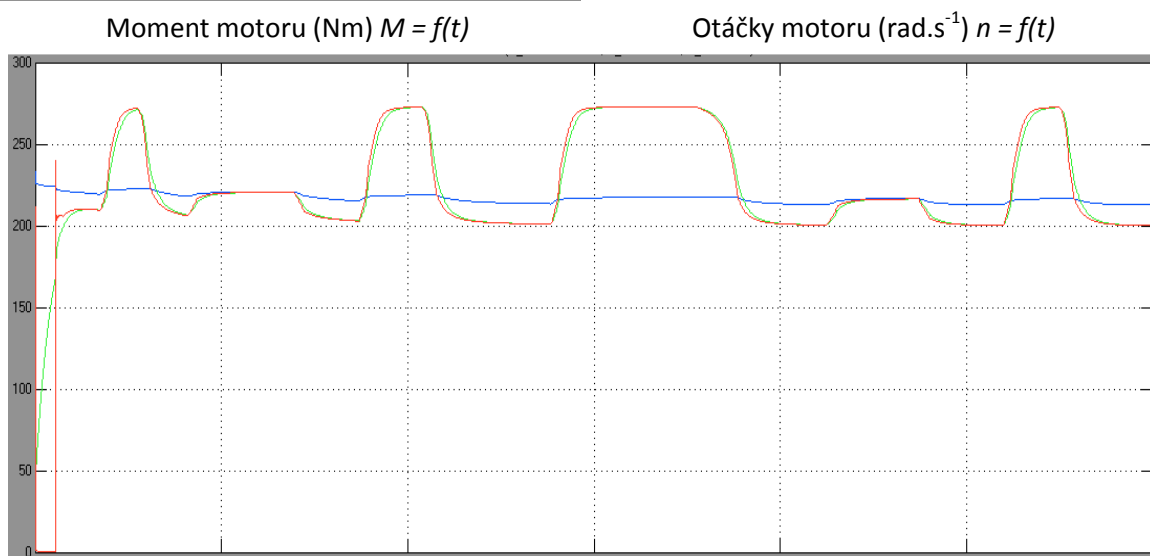
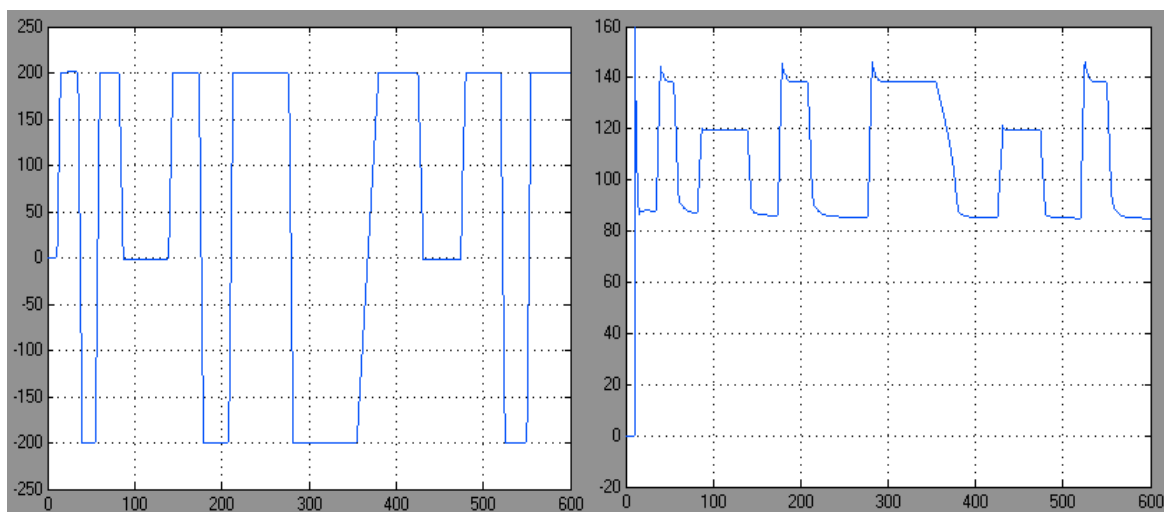
Napětí (V) na zátěži (červená), akumulátoru (modrá) a ultrakapacitoru  $U = f(t)$



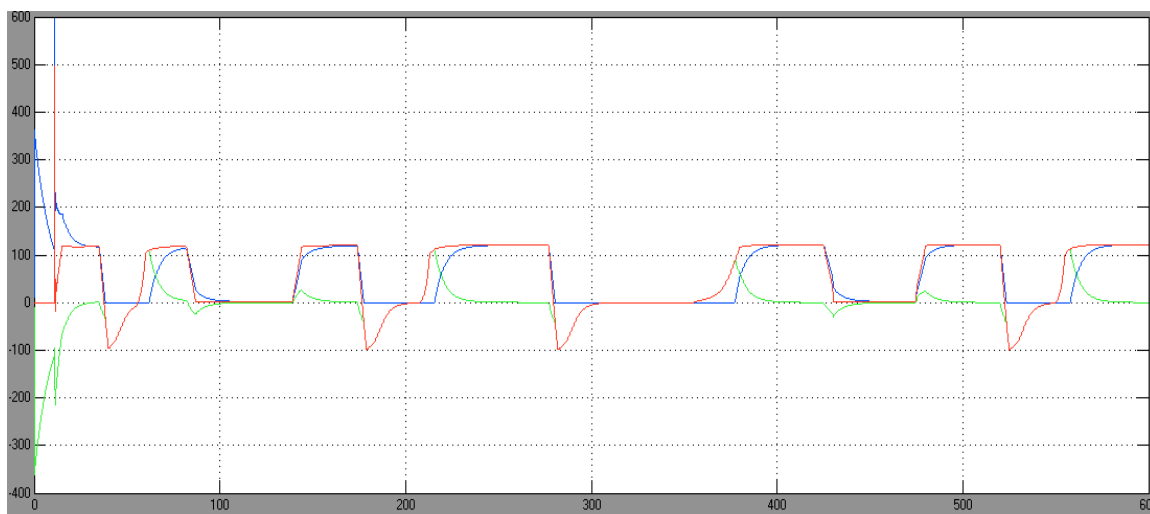
Proud (A) zátěží (červená), akumulátoru (modrá) a ultrakapacitoru  $I = f(t)$

Obrázek 67: Průběhy napětí a proudů v simulované soustavě

Následující průběhy demonstrují simulaci vícezdrojového systému pro časový úsek 600 s při střídání pracovních režimů stroje v zátěži. Je zde viditelné nabíjení ultrakapacitorové baterie při generátorickém chodu motoru a následná distribuce energie při změně žádaného momentu.



Napětí (V) na zátěži (červená), akumulátoru (modrá) a ultrakapacitoru (zelená)  $U = f(t)$



Proud (A) zátěží (červená), akumulátoru (modrá) a ultrakapacitoru (zelená)  $I = f(t)$

## 5 Experimentální výsledky s elektromobilem CityEL

Experimentální výsledky testování pohonných jednotek vozidla CityEL byly prováděny jak při jízdách po parkovištích VŠB-TU Ostrava, a to převážně v prvotních fázích, tak později v laboratoři Automobilové elektroniky a diagnostiky na válcové zkušební výkonu<sup>7</sup>. Hlavní předností a důvodem testování na válcové zkušební výkonu, bylo možnost nastavení shodných jízdních parametrů pro testy a měření, což by bylo velmi obtížné zabezpečit při testování v terénu.

Testování bylo rozčleněno na následující úlohy:

- Testování pohonné jednotky elektromobilu se stejnosměrným měničem a DC motorem napájeným z olověných akumulátorů
- Testování pohonné jednotky elektromobilu se stejnosměrným měničem a DC motorem napájeným z ultrakapacitorové baterie
- Testování pohonné jednotky elektromobilu se střídavým měničem a synchronním motorem s permanentními magnety napájeným z LiFePO<sub>4</sub> akumulátorů

### 5.1 Testování pohonné jednotky elektromobilu se stejnosměrným měničem a DC motorem napájeným z olověných akumulátorů

První měření na vozidle CityEL bylo provedeno ihned po jeho nutných úpravách a rekonstrukci, aby se experimentálně zjistili jeho jízdní vlastnosti. Elektromobil byl napájen třemi 12 V gelovými akumulátory s kapacitou 100 Ah, zapojenými v sérii, tj. s celkovým napětím 36 V. Vozidlo CityEL je standardně z výroby osazeno stejnosměrným motorem s permanentními magnety, ke kterému byl uzpůsoben jednodvadrantový DC/DC měnič s mikroprocesorovým

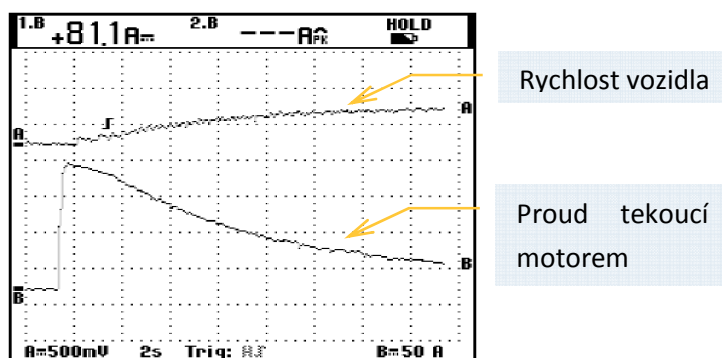


Obrázek 68: Vozidlo CityEL na válcové zkušební výkonu

---

<sup>7</sup> Válcová zkušebna výkonu měří výkon přímo na vozidle, kdy motor zůstává v autě, poháněná kola jsou umístěna na válcích, jejichž otáčením se snímá rychlost vozidla. Tyto válce jsou brzděny elektrodynamickou vířivou brzdou spojenou přes rameno s tenzometrem, ze kterého se následně snímají údaje o přenášeném momentu na vozovku.

řízením PWM. Jízdou experimentálního vozidla na válcích výkonové zkušebny (Obrázek 68) bylo na jedno nabití baterie uražena dráha 38 km. Maximální rychlost vozidla byla  $36 \text{ km.h}^{-1}$ . Následující průběh z měření (Obrázek 69) dokumentuje průběh rychlosti (kanál A, horní průběh,  $35 \text{ km.h}^{-1}/\text{div}$ ) a průběh proudu tekoucího motorem (kanál B, dolní průběh,  $50 \text{ A/div}$ ).



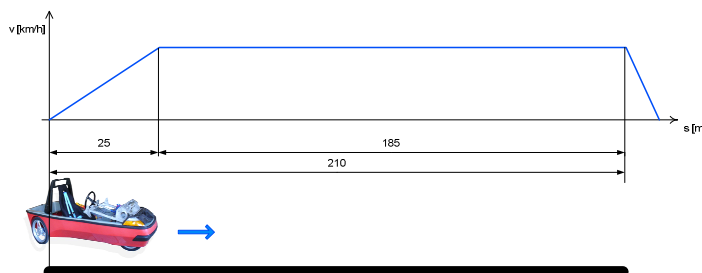
Obrázek 69: Změřená rychlost vozidla ( $35 \text{ km.h}^{-1}/\text{div}$ ) a proud motorem ( $50 \text{ A/div}$ )

## 5.2 Testování pohonné jednotky elektromobilu se stejnosměrným měničem a DC motorem napájeným z ultrakapacitorové baterie

Pohonná soustava byla testována v experimentálním vozidle CityEL a to převážně z důvodu nízké pohotovostní hmotnosti vozidla kolem 200 kg. Vozidlo bylo osazeno pulzním DC/DC měničem, který obsahoval ultrakapacitorovou baterii s nominální kapacitou 176 F a maximálním napětím 46 V. Pulzní měnič byl upraven pouze jako snižující měnič s řízením realizovaným mikroprocesorem Freescale 56F8037. Program zahrnoval jak vlastní řízení spínacího prvku s PWM s řízením rozběhu motoru s proudovým omezením, tak zpracování signálů z čidel, které snímaly napětí ultrakapacitorové baterie, proud tekoucí do motoru, rychlost a ujetou vzdálenost vozidla. Vzhledem k nízkému výkonu použitého motoru se rozběh s proudovým omezením neosvědčil jako úsporný, dokonce znemožňoval jízdu vozidla do vrchu při udržení žádané rychlosti. Pohon v testovacím vozidle byl vytvořen ze stejnosměrného motoru s permanentními magnety, který byl přes převodovku, tvořenou dvěma koly a zubovým řemenem, propojen s nápravou. Měření bylo prováděno v terénu a bylo rozděleno do dvou experimentálních úloh:

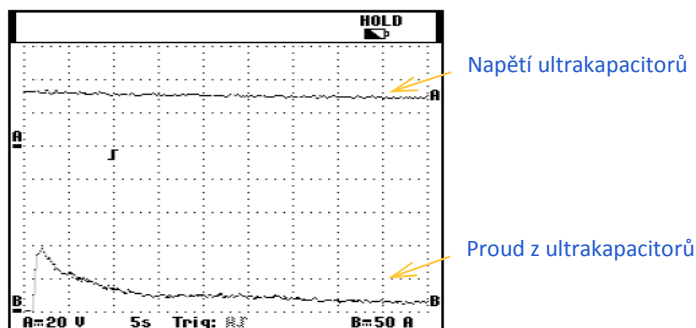
### 5.2.1 Experimentální úloha č. 1

Vozidlo je urychlováno na rovném úseku (Obrázek 70) konstantním zrychlením  $a = 0,55 \text{ m.s}^{-2}$  po dráze 25 m na rychlost  $20 \text{ km.h}^{-1}$ . Po 210 m je zastaveno, otočeno a opět urychleno na rychlost  $20 \text{ km.h}^{-1}$ .



Obrázek 70: Grafický popis jízdního manévru úlohy č. 1

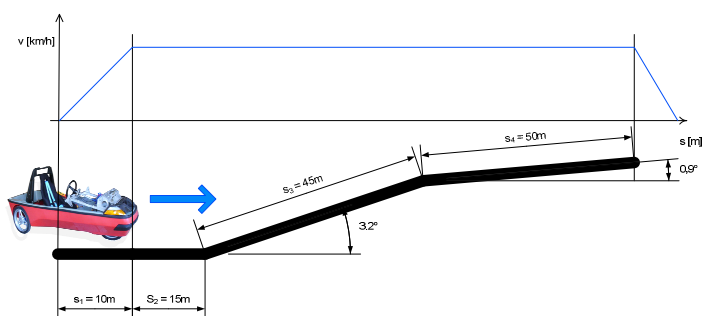
Maximální vzdálenost, kterou je vozidlo schopno urazit při požadovaných parametrech akcelerace a jízdy ustálenou rychlostí, bude 630 m. Důvodem je, že po ujetí této vzdálenosti se ultrakapacitory z původního napětí 43 V vybijí na hodnotu cca 22 V. Při této hodnotě napájecího napětí, již motor nedokáže vyvinout potřebný moment (21,6 Nm) pro akceleraci s požadovaným zrychlením.



Obrázek 71: Průběhy napětí (20V/div) a proudů (50A/div) na ultrakapacitorové baterii

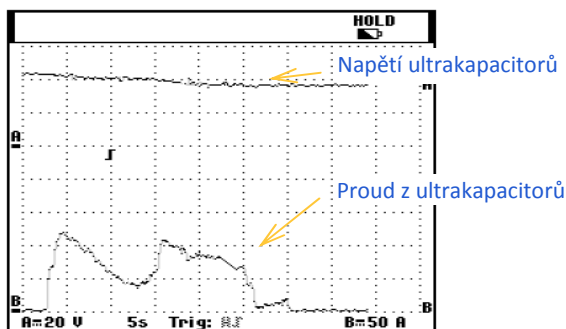
### 5.2.2 Experimentální úloha č. 2

Testované vozidlo je urychlováno (Obrázek 72) na rovném úseku konstantním zrychlením  $a = 1,375 \text{ m.s}^{-2}$  na rychlost  $20 \text{ km.h}^{-1}$ . Po 25m začne stoupat na šikmou dráhu 45 m se stoupáním 5,5%, následně se stoupáním 1,6% po dráze 50 m.



Obrázek 72: Grafický popis jízdního manévru úlohy č.2

Napětí ultrakapacitorové baterie pokleslo z původního napětí 43 V o 10,3 V na 32,7 V po uražení vzdálenosti 120 m s celkovým převýšením 3,4 m.



Obrázek 73: Průběhy napětí (20V/div) a proudů (50A/div) ultrakapacitorové baterie



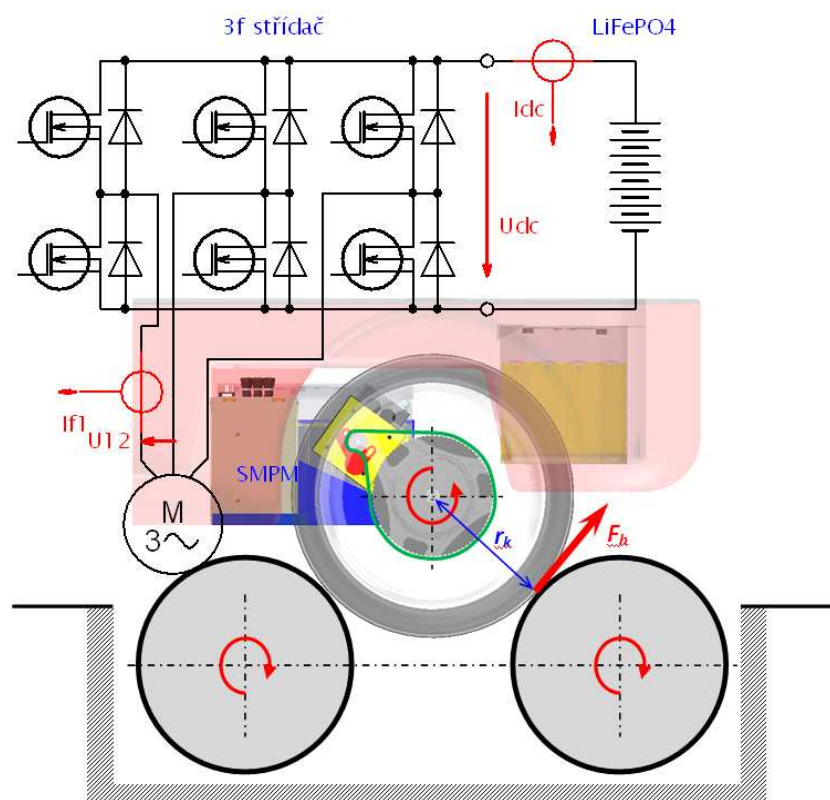
Testovací jízdy ve dvou různých jízdních manévrech prokázaly prospěšnost využití ultrakapacitorů v trakci. Z naměřených průběhů (Obrázek 71 a 73) lze pozorovat průběh proudu z ultrakapacitorů. Pro primární zdroj energie (trakční akumulátor, palivový článěk, atd.) v elektromobilu je ideální zatížení konstantním proudem, zatímco vysoké změny proudu jsou hrazeny z ultrakapacitorové baterie. Testováním bylo zjištěno, že ultrakapacity byly schopny dodat proudy přes 200 A. Při experimentálních jízdách bylo zjištěno, že pouze s ultrakapacitorovou baterií o kapacitě 176 F/46 V činí dojezdová vzdálenost elektromobilu CityEL přes 1 km.

### 5.3 Testování pohonné jednotky elektromobilu se střídavým měničem a synchronním motorem s permanentními magnety napájeným z LiFePO<sub>4</sub> akumulátorů

Měření na pohonné soustavě se SMPM motorem a třífázovým střídačem napájeným z LiFePO<sub>4</sub> akumulátorů (Obrázek 74) bylo opět prováděno z hlediska opakovatelnosti a jednoznačnosti nastavení na válcové zkušební výkonu.

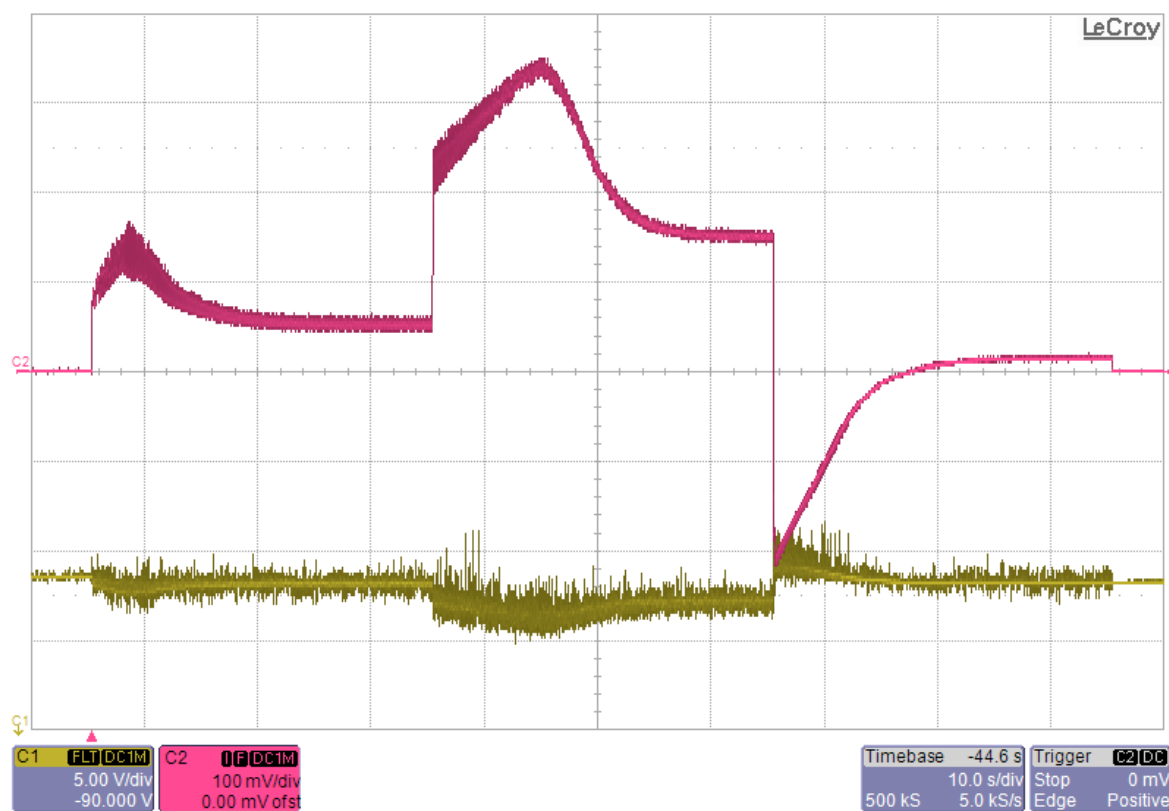
Jednotlivá měření byla provedena při zatěžovacích silách 0 N, 100 N a 200 N válcové brzdy. Řídicí systém měniče měl nastavené proudové omezení na 90 A maximálního fázového proudu. Časová závislost otáček motoru (rychlosti jízdy vozidla) byla konstantní a nastavená následovně:

0 – 30s .....	1000 min <sup>-1</sup> (14 km.h <sup>-1</sup> )
30 – 60s .....	2500 min <sup>-1</sup> (35 km.h <sup>-1</sup> )
60 – 90s .....	500 min <sup>-1</sup> (7 km.h <sup>-1</sup> )

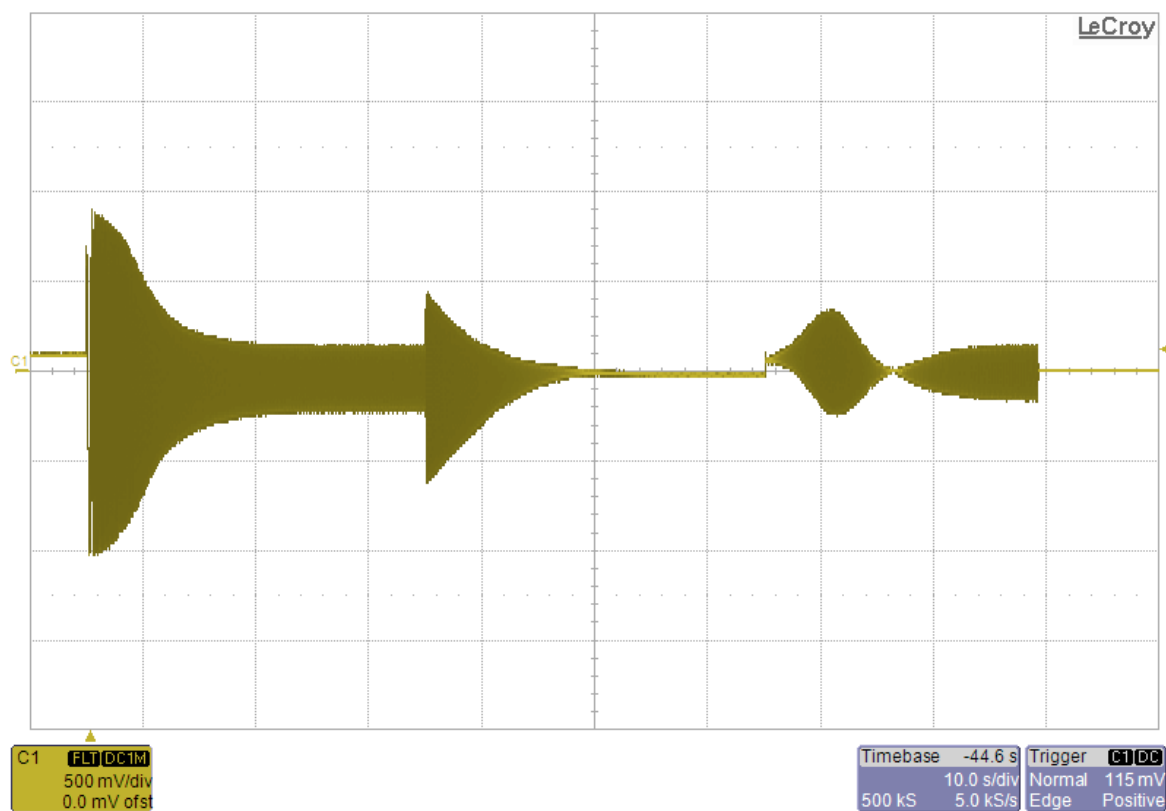


Obrázek 74: Demonstrační obrázek měřené úlohy

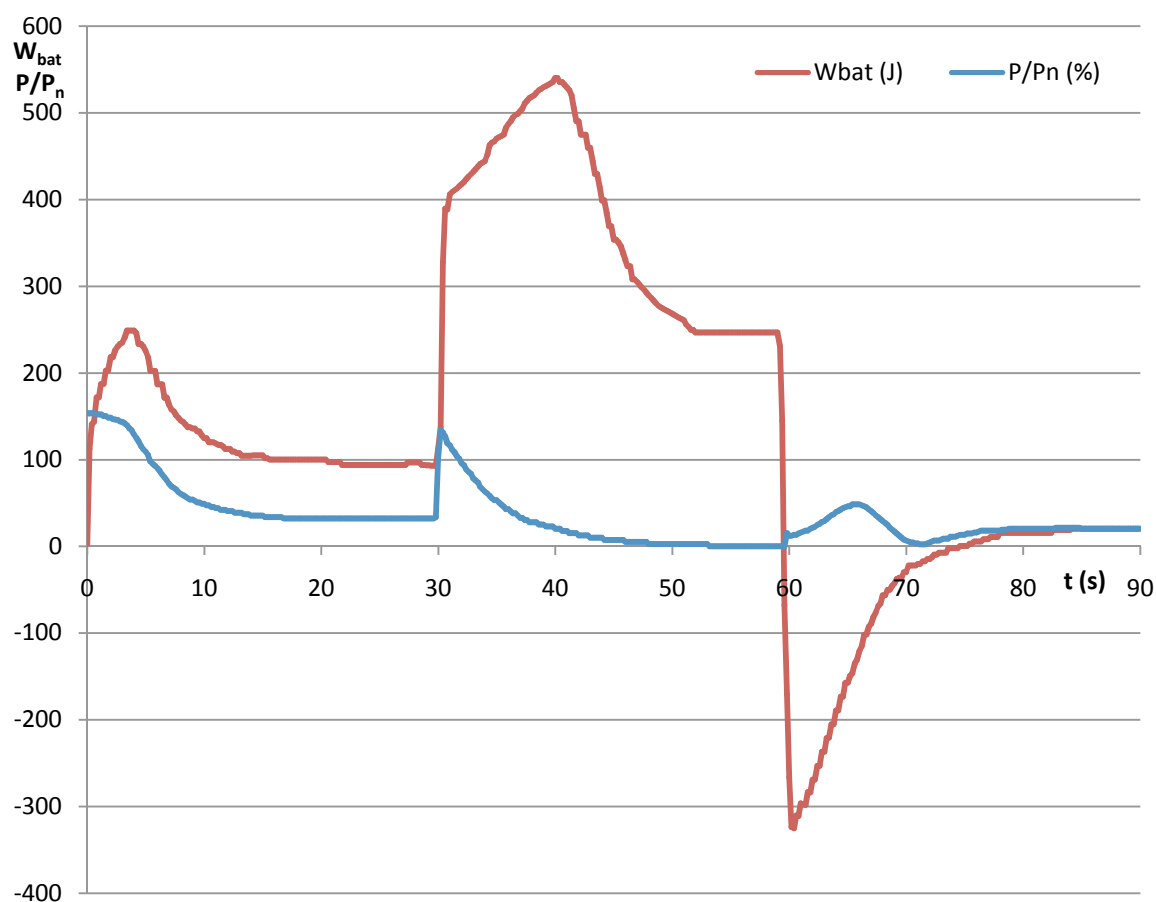
### 5.3.1 Síla válců brzdy 0N



Obrázek 75: Proud (červená, 10A/div) a napětí (žlutá, 5V/div) akumulátoru při  $F_b = 0 \text{ N}$



Obrázek 76: Proud fáze (50A/div) SMPM motoru při  $F_b = 0 \text{ N}$



Obrázek 77: Grafická závislost spotřebované energie  $W = f(t)$ , a poměru  $P/P_n = f(t)$

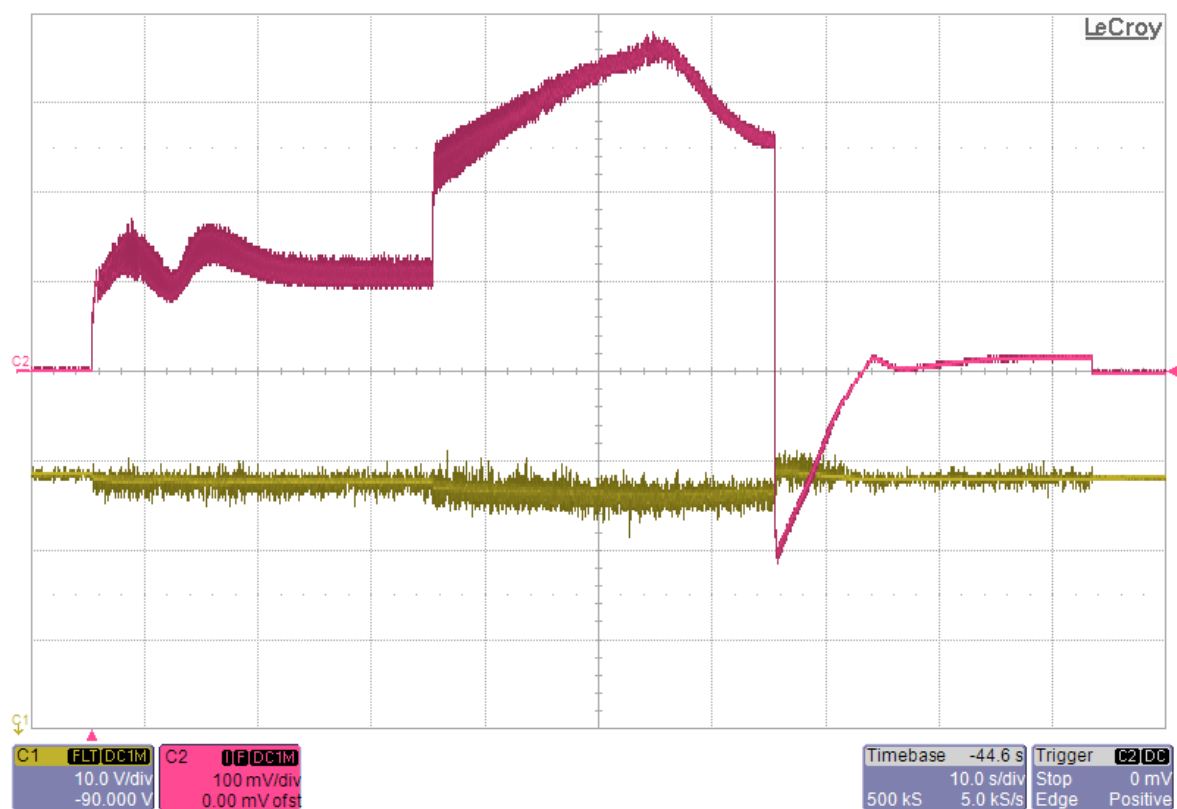
#### 5.3.1.1 Shrnutí naměřených výsledků pro žádanou sílu válcové brzdy $F_b = 0\text{ N}$

Naměřené a vypočtené výsledky měření tříkolového vozidla CityEL na válcové zkušební výkonu dokumentují výše uvedené osciloskopické a vypočtené průběhy (Obrázek 75, 76 a 77) a jsou shrnuty v tabulce 7. Válcová brzda neměla nastavenou žádnou brzdovou sílu ( $F_b = 0\text{ N}$ ) a byla vozidlem volně protáčena.

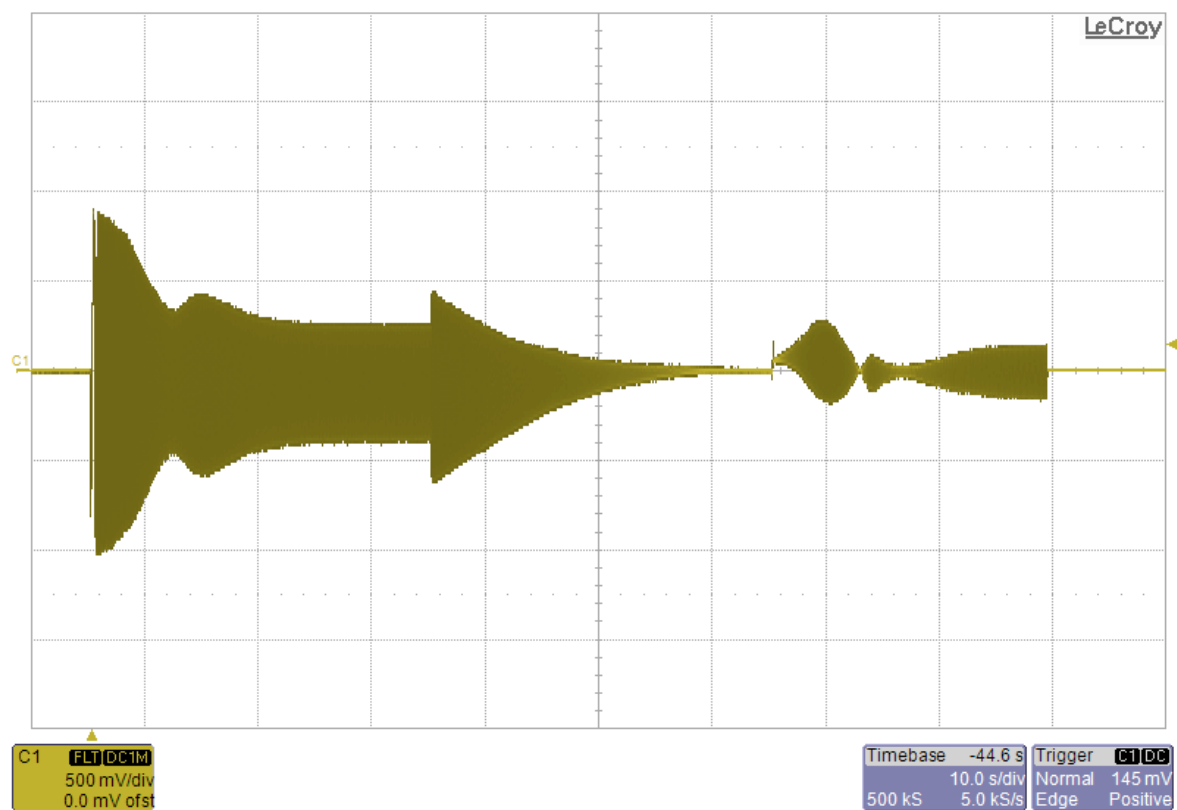
Tabulka 7: Shrnutí výsledku pro  $F_b = 0\text{ N}$

Maximální amplituda fázového proudu	$I_{\max}$ (A)	93,4 A
Střední příkon motoru	$P_{AV}$ (W)	498 W
Zatížení motoru	$z_{\text{mot}}$ (%)	34%
Spotřebovaná energie motoru	$W_{\text{mot}}$ (Wh)	12,5 Wh
Dodaná energie z akumulátorů	$W_{\text{aku}}$ (Wh)	18,2 Wh
Účinnost transpozice energie	$\eta$ (%)	68,7%

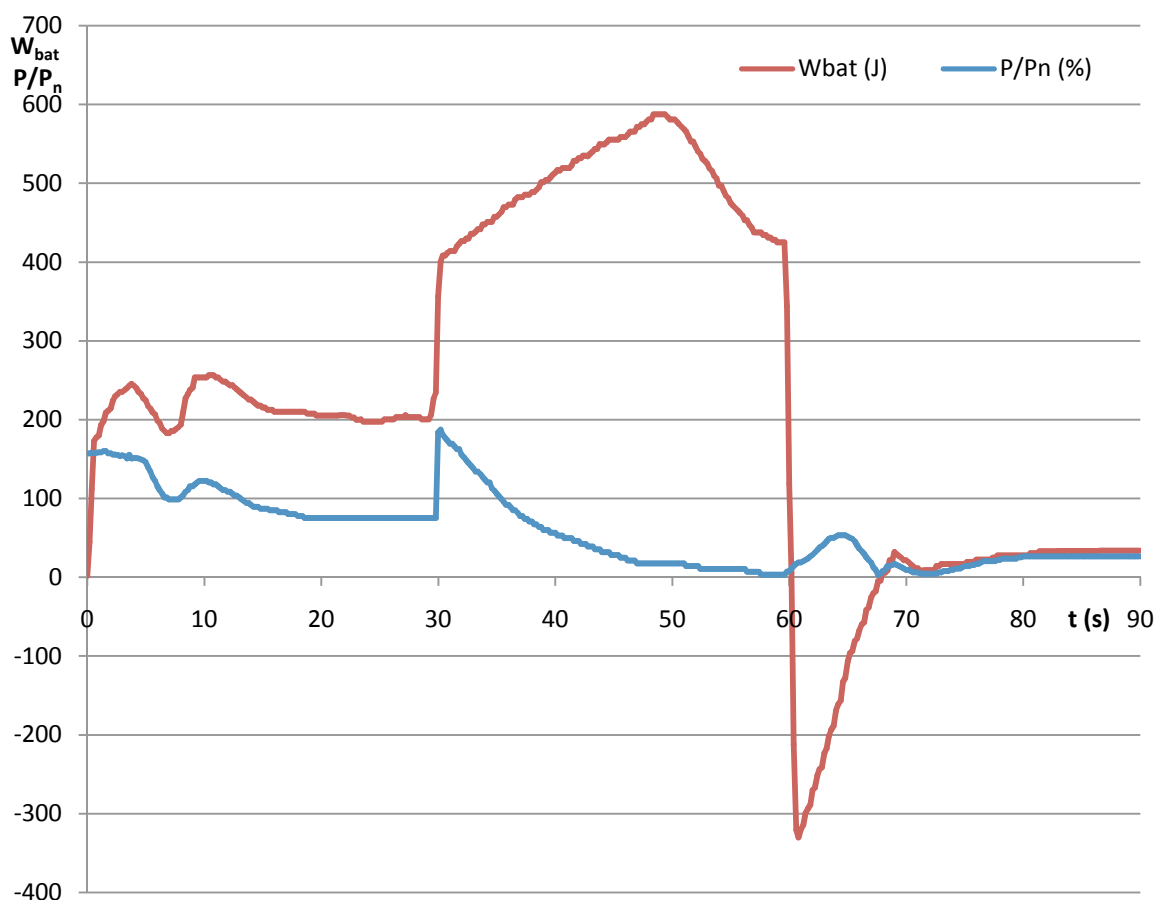
### 5.3.2 Síla válců brzdy 100N



Obrázek 78: Proud (červená 10A/div) a napětí (žlutá 5V/div) akumulátoru při  $F_b = 100 \text{ N}$



Obrázek 79: Proud fáze (50A/div) SMPM motoru při  $F_b = 100 \text{ N}$



Obrázek 80: Grafická závislost spotřebované energie  $W = f(t)$  a poměru  $P/P_n = f(t)$

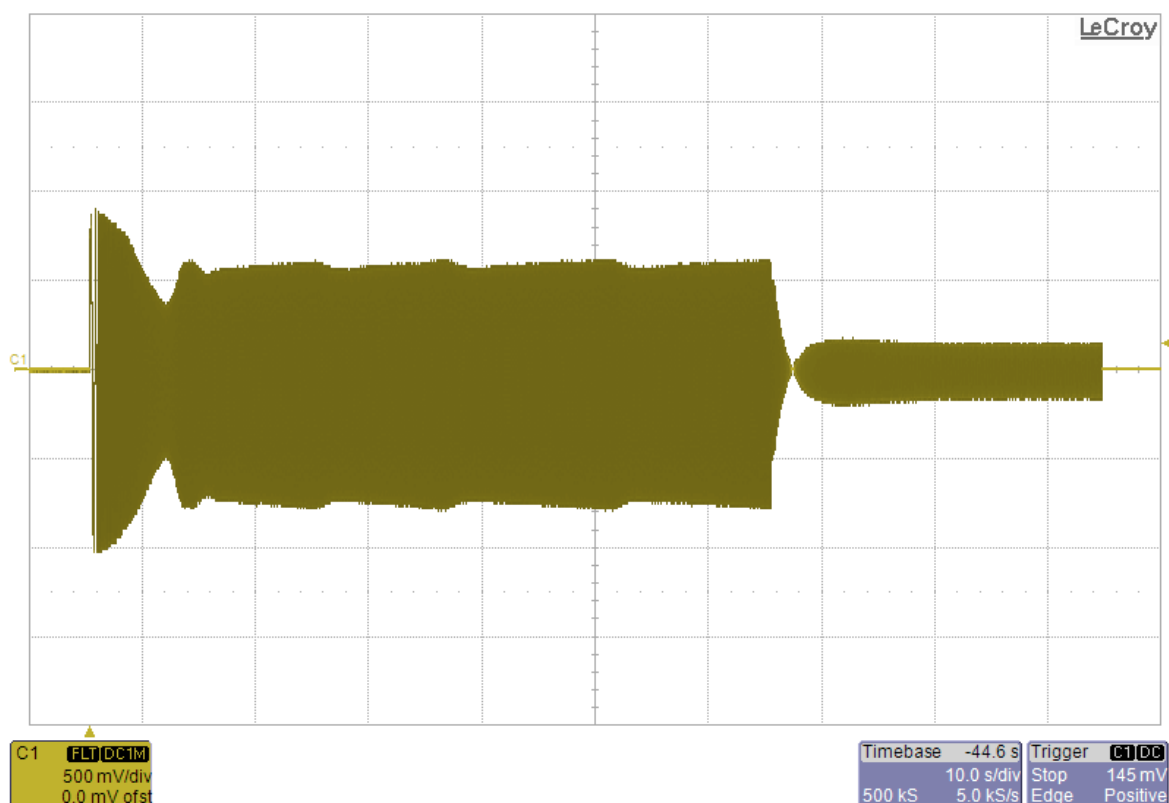
### 5.3.2.1 Shrnutí naměřených výsledků pro žádanou sílu válcové brzdy $F_b = 100\text{ N}$

Naměřené a vypočtené výsledky měřeného tříkolového vozidla CityEL na válcové zkušební výkonu dokumentují výše uvedené osciloskopické průběhy (Obrázek 78, 79 a 80) a jsou shrnuty v tabulce 8. Žádná brzdná síla válcové brzdy byla nastavena na hodnotu  $F_b = 100\text{ N}$ . Z výše uvedených průběhů (Obrázek 78, 79 a 80) je viditelné zpožděné působení brzdné síly válcové brzdy, neboť brzdění nezačíná hned od nulové rychlosti (otáček), ale až po překročení hranice  $10\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Tabulka 8: Shrnutí výsledků pro  $F_b = 100\text{ N}$

Maximální amplituda fázového proudu	$I_{\max}$ (A)	91 A
Střední příkon motoru	$P_{AV}$ (W)	843 W
Zatížení motoru	$z_{\text{mot}}$ (%)	58%
Spotřebovaná energie motoru	$W_{\text{mot}}$ (Wh)	21,1 Wh
Dodaná energie z akumulátorů	$W_{\text{aku}}$ (Wh)	28,7 Wh
Účinnost transpozice energie	$\eta$ (%)	73,6%

### 5.3.3 Síla válců brzdy 200N



Obrázek 81: Proud fáze (50A/div) SMPM motoru při  $F_b = 200 \text{ N}$

#### 5.3.3.1 Shrnutí naměřených výsledků pro žádanou sílu válcové brzdy $F_b = 200 \text{ N}$

Naměřené a vypočtené výsledky měřeného tříkolového vozidla CityEL na válcové zkušebně výkonu dokumentují výše uvedené osciloskopické průběhy (Obrázek 81) a jsou shrnuty v tabulce 9. Žádná brzdná síla nastavená na válcové zkušebně výkonu měla na hodnotu  $F_b = 200 \text{ N}$ . Z výše uvedeného průběhu (Obrázek 81) je opět viditelné zpoždění působení brzdné síly po překročení hranice  $10 \text{ km.h}^{-1}$ . Následně motor běží na proudovém omezení regulátorů a jeho otáčky poklesnou na hodnotu  $800 \text{ min}^{-1}$ . Maximální hodnota brzdné síly, při níž je možné stále dosáhnout na žádanou hodnotu rychlosti  $35 \text{ km.h}^{-1}$  (otáček motoru  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ ) je  $188 \text{ N}$ .

Tabulka 9: Shrnutí výsledků pro  $F_b = 200 \text{ N}$

Maximální amplituda fázového proudu	$I_{\max} \text{ (A)}$	91,8 A
Střední příkon motoru	$P_{AV} \text{ (W)}$	852 W
Zatížení motoru	$z_{\text{mot}} \text{ (%)}$	59%
Spotřebovaná energie motoru	$W_{\text{mot}} \text{ (Wh)}$	21,36 Wh

## Závěr

Tato práce si kladla za cíl být přínosem v oblasti zkoumání elektromobilů a hybridních automobilů, a to především v oblasti struktur zdrojových a pohonných systémů, jejichž závěry můžeme shrnout v několika bodech:

- Byl proveden popis současného stavu komerčně řešených pohonných systémů elektromobilů a hybridních vozidel, specifikována problematika alternativních napájecích zdrojů a prostředků akumulace energie včetně vytvoření simulačních modelů pro modelování pohonných struktur a vybraných napájecích zdrojů. V teoretické části byly představeny i některé neznámé či nepříliš rozšířené zdroje energie, jako jsou fotovoltaické panely, palivový článek či setrvačnickový akumulátor.
- Cílem disertační práce bylo vytvořit a podrobněji specifikovat simulační modely popisující jízdní vlastnosti a energetické bilance pohonu. Na základě této aplikace a jejího porovnání se skutečným jízdním profilem byla vytvořena ucelená simulační úloha se záměrem co nejvěrněji popsat chování dopravního prostředku. Dostatek prostoru byl přitom věnován zejména problematice simulačního modelu pohonného systému a vytvoření experimentálního modelu. Jelikož na problematiku elektromobilů a hybridních vozidel včetně simulací jejich pohonných struktur existuje nespočetné množství úhlů pohledu, nemohou být ani závěry práce úplné a vyčerpávající, zevrubnější výzkum by je jistě doplnil, ne-li modifikoval.
- Práce rovněž usilovala o zdokumentování experimentálních výsledků na malém elektromobilu CityEL, které po komparaci se simulačními výsledky prokázaly správnost simulačních modelů. Pro získání experimentálních výsledků byly realizovány prototypy vhodných měničů a bylo vytvořeno měřicí pracoviště výkonového zatěžování elektromobilů. Zhotovení experimentálního modelu s vozidlem CityEL obnášelo sestavení nového měniče, návrh a výrobu konstrukčních dílů, sestavení akumulátorového zdroje a oživení jeho bateriového managementu což vyžadovalo nezbytné technické dovednosti aplikované v praxi. Vyjdeme-li z této zkušenosti, uvědomíme si, jaké výhody má flexibilita a variabilita simulačního modelu pohonného systému. V současné době se dále pracuje na zdokonalování a rozšiřování simulačních modelů, které daly základ novým diplomovým pracím a staly se jedním ze směrů vývoje vědeckovýzkumné činnosti na Katedře elektroniky.

Závěrečné shrnutí – zpracování problematiky v teoretické části lze považovat za výzkum, který byl realizován komparativním způsobem. Praktická část práce představuje simulační modely jako relevantní nástroje pro návrh elektromobilu či hybridního vozidla, jejichž správnost je prověřena simulačními a experimentálními výsledky.

## Publikace autora

- [I.] Brandštetter, P., Bílek, P., Szotkowski, J., Vaculík, P.: *Measurement and Signal Processing for Electric Drive Control System*, 29th PIERS 2011, March 20-23, Marrakesh, MOROCCO 2011, (*indexace na Web of Science v jednaní*)  
ISBN 978-1-934142-16-5: PIERS Proceedings p. 1416 – 1420  
ISSN 1559-9450: <http://piers.org/piersproceedings/piers2011MarrakeshProc.php>
- [II.] Brandštetter, P., Bílek, P., Szotkowski, J., Vaculík, P.: *Sensorless Control of Asynchronous Motor Using Voltage Signal Injection*, 29th PIERS 2011, March 20-23, Marrakesh, MOROCCO 2011, (*indexace na Web of Science v jednaní*)  
ISBN 978-1-934142-16-5: PIERS Proceedings p. 1421 – 1425  
ISSN 1559-9450: <http://piers.org/piersproceedings/piers2011MarrakeshProc.php>
- [III.] Chlebiš, P., Pfof, Z., Havel, A., Vaculík, P.: *Soft-switched Converter for Ultracapacitors*, 29th PIERS 2011, March 20-23, Marrakesh, MOROCCO 2011, (*indexace na Web of Science v jednaní*)  
ISBN 978-1-934142-16-5: PIERS Proceedings p. 1430 – 1433  
ISSN 1559-9450: <http://piers.org/piersproceedings/piers2011MarrakeshProc.php>
- [IV.] Havel, A., Chlebiš, P., Vaculík, P., Pfof, Z.: *Modern Instruments for increasing the Efficiency of the Energy Transfer in Electric Vehicles*. In *EPE-PEMC 2010 14th International Power Electronics and Motion Control Conference in Ohrid, Republic of Macedonia*. 2010, vol. 14., p. 89-93, ISBN 978-1-4244-7854-5, (*indexace na Web of Science v jednaní*)
- [V.] Chlebiš, P., Havel, A., Vaculík, P., Odlevák, L.: *The Design and Simulation of the Axial Air Gap Induction Motor*, Electric Power Engineering – EPE 2011, Kouty nad Desnou (*indexace na Web of Science v jednaní, článek v tisku*)
- [VI.] Chlebiš, P., Havel, A., Slivka D., Vaculík P.: *The Design of Axial Flux Rotary Converter for Hybrid Electric Vehicles*, Applied Electronics 2011, Plzeň, ISSN 1803-7232 (*indexace na Web of Science v jednaní, článek v tisku*)
- [VII.] Pfof, Z., Vaculík, P.: *Ultracapacitors Utilization for Automotive Applications*. In časopise Acta Polytechnica, 2010, vol. 2010/1, čis. 50, p. 35-39, ISSN 1210-2709
- [VIII.] Šimoník, P.; Chlebiš, P.; Pfof Z.; Vaculík P.: *The New Type of Resonant Active Power Filter*, EPE 2010 Brno (*indexace na Web of Science v jednaní, článek v tisku*)
- [IX.] Pfof, Z., Vaculík, P., Chlebiš, P., Hromják, M.: *Měniče se zvýšenou účinností pro všeobecné použití*. In *sborník EPVE09*. Ed. Pavel Vorel, Dalibor Červinka, Brno: VUT FEKT UVEE Brno, 2009, ISBN 978-80-214-3974-0



- [X.] Pfof, Z., Vaculík, P.: *Using of Ultracapacitors for Automotive Applications*. In *sborník POSTER 2009*, Praha:ČVUT FEL, 2009, vol. 13., 1.
- [XI.] Vaculík, P., Pfof, Z., Chlebiš, P., Moravčík, P.: *Direct Torque Control Methods for Three-level Voltage Inverter*. In *sborník EPE 2009*, Ostrava:, 2009, vol. 10., 078-80-248-1947-1 (v databázi Web of Science)
- [XII.] Vaculík, P.: *Electric car with high efficiency drive system*. In *WOFEX 2009*. Ed. Pavel Moravec, Jiří Dvorský, Václav Snášel, Ostrava:Faculty of Electrical Engineering Computer Science, VŠB - Technical University of Ostrava, 2009, vol. 7th, p. 36-41, Faculty of Electrical Engineering Computer Science, VŠB - TU of Ostrava, ISBN 978-80-248-2028-6
- [XIII.] Vaculík, P., Pfof, Z.: *Experimentální výsledky s DC/DC měničem s ultrakapacitory v testovacím vozidle CityEL*. In *sborník XXXI. celostátní konference o elektrických pohonech*, Plzeň 2009, Česká elektrotechnická společnost UOS Elektrické pohony, 978-80-02-02151-3
- [XIV.] Vaculík, P., Rech, P.: *New Converters for Electric Vehicles*. In *IWCIT08*, Gliwice:Silesian University of Technology, 2008, p. 101-106, EAN 9788390474380
- [XV.] Vaculík, P.: *Conception of Monoposto with Electric Drive*. In *WOFEX 2008*. Ed. Václav Snášel, Ostrava: Tiskárna Tiskservis, 2008, vol. 2008/1, ISBN 978-80-248-1807-8
- [XVI.] Vaculík, P., Rech, P.: *Converters for Hybrid Car Technology*, POSTER, Praha:, 2008
- [XVII.] Vaculík, P., Rech, P., Mlčák, T.: *Jednotka záskokového zdroje s palivovým článkem*. In *ERU 2008*, 2008, ISBN 978-80-254-3821-3
- [XVIII.] Vaculík, P., Pfof, Z.: *Koncepce pohonu vozidla CityEL s využitím palivového článku*. In *EPVE 2008*. Ed. Bohumil Klíma, Dalibor Červinka, Pavel Vorel, Brno:Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2008, VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, ISBN 978-80-7204-603
- [XIX.] Vaculík, P., Moravčík, P.: *Metody přímého řízení momentu tříúrovňového napěťového střídače*. In *EE - Časopis pre elektrotechniku a energetiku*, 2008, vol. 14. ročník, čís. mimořádné, s. 40 – 44
- [XX.] Vaculík, P.: *Střídač hlavního pohonu elektromobilu s vodním chlazením*, Ostrava 2007, Diplomová práce
- [XXI.] Moravčík, P., Osmančík, L., Dostalík, M., Chlebiš, P., Vaculík, P.: *Zkušenosti z oblasti výuky konstrukce měničů na VŠB*. In *sborník*, Plzeň:, 2007, ISBN 978-80-02-01921-3

## Řešené grantové projekty

- Česká grantová agentura - GAČR 102/08/0775 - *Nové struktury a řídicí algoritmy mobilních hybridních systémů*
- Česká grantová agentura - GAČR 102/05/H525 - *Racionalizace studia doktorského studijního programu na FEI VŠB-TU Ostrava*
- Interní grantová agentura – IGA – Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů.
- MPO projekt FR-TI/223 - *Výzkum a vývoj sekundárních a terciálních řídicích systémů elektromobilu*
- MPO projekt FR-TI/223 - *Vývoj, realizace a testování polovodičových měničů pro pohon elektromobilu*
- Studentská grantová soutěž – SGS SP2011/103 - *Výzkum struktur subsystémů akumulace*

## Literatura

1. **Bishop, R. H.** *The Mechatronics Handbook*. Austin : The University of Texas at Austin, 2002. ISBN 0-8493-0066-5.
2. **Dhameja, Sandeep.** *Electric Vehicle Battery Systems*. Boston : Newnes, 2002. ISBN 0-7506-9916-7.
3. **Šulovský, Ľubomír.** História elektromobilov IV. časť. *elektromobily.sk*. [Online] elektromobily.sk, 4. 1 2010. [Citace: 8. 10 2010.] <http://elektromobily.sk/clanky/historia-elektromobilov-iv-cast>.
4. **Vegr, Jaromír.** Elektromobily - Historie a současnost. *PRO-ENERGY*. 2008, 3, stránky 44-50.
5. **Zoroofi, Siavash.** *Modeling and Simulation of Vehicular Power Systems*. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2008. ISSN 1652-8557.
6. *Modeling and Simulation of Electric nad Hybrid Vehicles*. **Wenzhong, David, Mi, Chris a Emadi, Ali.** 4, Michigan : University of Michigan Library, 2007, Sv. 95. ISSN 0018-9219.
7. **Poncarová, Jana.** Elektromobily v Česku: Kdy bude elektrická Škoda Fabia? *nalezno.cz*. [Online] xBizon, s.r.o., 7. 7 2009. [Citace: 4. 11 2010.] <http://www.nazeleno.cz/technologie-1/hybridy-a-elektromobily-1/elektromobily-v-cesku-kdy-bude-elektricka-skoda-fabia.aspx>.
8. **i4wifi a.s.** Lithium Ytrium High Power Cell LiFePO4/LiFeYPO4. *www.i4wifi.cz*. [Online] i4wifi a.s., 2011. <http://www.i4wifi.cz/?cls=stoitem&stiid=1123>.
9. **Lupsiasca, Cristi.** Toshiba's Methanol Fuel Cell Might Power Your Future Gadgets. *www.greenoptimistic.com*. [Online] 10 2009.
10. **EG&G Technical Services.** *Fuel Cell Handbook*. 7. Morgantown : U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, 2004.
11. **Horčík, Jan.** Honda ohlašuje vodíkový model FCX Clarity v Japonsku. *www.hybrid.cz*. [Online] 15. 6 2008. <http://www.hybrid.cz/novinky/honda-ohlasuje-vodikovy-model-fcx-clarity-v-japonsku>.
12. TriHyBus - Vodíkový autobus s palivovými články. <http://www.trihybus.cz/>. [Online] Ústav jaderného výzkumu Řež a.s. , 2010. <http://www.trihybus.cz/>.
13. **Maxwell Technologies.** Gateway to a New Thinking in Energy Management - Ultracapacitors. *www.maxwell.com*. [Online] Maxwell, San Diego, 2005.
14. **Dispennette, John.** *Gateway to a New Thinking in Energy Management - Ultracapacitors*. místo neznámé : Maxwell Technologies, 2010.
15. **Hyan, Tom.** Porsche 911 GT3 R Hybrid - Setrvačnick... *www.automotorevue.cz*. [Online] 20. 1 2011. <http://www.automotorevue.cz/auto/predstavujeme/porsche-911-gt3-r-hybrid-setrvacnik.html>.
16. Aerodynamika. *www.autolexicon.net*. [Online] 20. 2 2009. <http://cs.autolexicon.net/articles/aerodynamika>. ISSN 1804-2554.
17. Car aerodynamics. *www.etre.cz*. [Online] 8 2009. <http://www.etre.cz/jpg-mjt/cx.jpg>.
18. **Vlk, František.** *Dynamika motorových vozidel*. Brno : Prof. Ing. františek Vlk, DrSc., 2003. ISBN 80-239-0024-2.
19. **Larminie, J.** *Electric Vehicle Technology Explained*. Wiley : autor neznámý, 2003. ISBN 0470851635.
20. **Ehsani, Mehrdad, a další.** *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. Illinois : CRC Press, 2005. ISBN 0-8493-3154-4.

21. **Beardmore, Roy.** Friction Factors. [www.roymech.co.uk](http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Tribology/co_of_frict.htm#Rolling). [Online] 10. 9 2010.  
[http://www.roymech.co.uk/Useful\\_Tables/Tribology/co\\_of\\_frict.htm#Rolling](http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Tribology/co_of_frict.htm#Rolling).
22. **Dub, Michal.** *Modelování a simulace elektrických pohonů v programu MATLAB-SIMULINK*. Brno : Univerzita obrany, Fakulta vojenských technologií, 2010. ISBN 978-80-7231-749-1.
23. **The MathWorks, MATLAB R2009b.** Battery. 2009.
24. *A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles*. **Tremblay, Olivier, Dessaint, Louis a Dekkiche, Abdel Illah.** místo neznámé : VPPC, 2007. Vehicle Power and Propulsion Conference. stránky 284 - 289.
25. **ThermoAnalytics, Inc.** Battery Modeling for HEV Simulation by ThermoAnalytics Inc. [www.thermoanalytics.com](http://www.thermoanalytics.com). [Online] 2008. [Citace: 26. 10 2010.]  
<http://www.thermoanalytics.com/docs/batteries.html>.
26. **Johansson, Patrik a Andersson, Björn.** *Comparison of Simulation Programs for Supercapacitor Modelling*. Gothenburg : Chalmers University of Technology, 2008. Master of Science Thesis.
27. *Superkapacitor pro hybridní pohon vozidla*. **Mindl, Pavel.** Plzeň : ČVUT Praha, 2003.
28. **Dvorský, Grigorij.** *Balancující BMS typu 2, verze 2*. Zlín : MGM compro.
29. **Chlebiš, Petr.** *Výkonová elektronika I : pro kombinované a distanční studium*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2003. stránky 51-56.
30. **Bober, Lukáš.** *Střídač s malým napájecím napětím pro mobilní aplikace*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2009. Diplomová práce.
31. **Rech, Pavel.** *Bezsenzorové řízení střídavého regulovaného pohonu se synchronním motorem s permanentními magnety*. Ostrava : VŠB - TU Ostrava, FEI, 2010. Disertační práce.
32. **TG Drives.** *Datalist synchronního motoru s permanentními magnety T4-0530-3048*. místo neznámé : TG Drives, 2009.
33. [www.ev-power.eu/index.php?src=blog-column](http://www.ev-power.eu/index.php?src=blog-column). [www.ev-power.eu](http://www.ev-power.eu). [Online] GWL/Power Group, 2010. <http://www.ev-power.eu>.
34. **Hadhazy, Adam.** A Better Battery? The Lithium Ion Cell Gets Supercharged. [www.scientificamerican.com](http://www.scientificamerican.com). [Online] Scientific American, 11. 3 2009. [Citace: 5. 8 2010.]  
<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=better-battery-lithium-ion-cell-gets-supercharged>.
35. **Biskup, Pavel.** Hybridní auta jsou nejlepší při jízdě ve městě. [www.21stoleti.cz](http://www.21stoleti.cz). [Online] RF HOBBY, s. r. o., 18. 8 2006. [Citace: 29. 10 2010.]  
<http://www.21stoleti.cz/view.php?cisloclanku=2006081816>.
36. TMC and Mazda Agree to Hybrid System Technology License. [www.greencarmagazine.net](http://www.greencarmagazine.net). [Online] 30. 3 2010. <http://www.greencarmagazine.net/?p=2492>.
37. **Krüger, Andreas.** Funktionsprinzip Brennstoffzelle. [www.energie.krueger-de.org](http://www.energie.krueger-de.org). [Online] 3 2008.  
<http://www.energie.krueger-de.org/bhkw/bszelle/>.
38. [www2.le.ac.uk](http://www2.le.ac.uk). [Online] University of Leicester, 2 2009. [Citace: 3. 5 2010.]  
<http://www2.le.ac.uk/departments/engineering/research/electrical-power/images/1.2%20kW%20Ballard%20Nexa%20Fuel%20Cell.JPG/view>.

39. **Beranovský, Jiří, a další.** Energie slunce - výroba elektřiny. *www.ekowatt.cz*. [Online] EkoWATT, 2007. <http://www.ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-slunce---vyroba-elektriny>.
40. **Couplard, John.** Car aerodynamic coefficients. *www.cardesignonline.com*. [Online] 6 2005. <http://www.cardesignonline.com/aerodynamic>.
41. *Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge.* **Shepherd, C. M.** 1965, Journal of Electrochemical Society, Sv. 112, stránky 657 - 664.
42. **Oleár, Martin, a další.** Ultrakapacity a jejich uplatnění v sekundárních zdrojích elektrické energie. *Technický týdeník*. 2007, 16.
43. **Smiles AG.** Produkte aus der Smiles-World. *www.smiles-world.de*. [Online] <http://www.smiles-world.de/produkte>.
44. **Novák, J.** Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice - 1. část. *Elektro*. 2006, 6, stránky 4-7. ISSN 1210-0889.
45. —. Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice - 2. část. *Elektro*. 2006, 7, stránky 8-11.
46. —. Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice - 3. část. *Elektro*. 2006, Sv. 8, stránky 76-78.
47. *Synchronní motory s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel.* **Černý, Ondřej, Doleček, Radovan a Novák, Jaroslav.** 2010. Vědeckotechnický sborník ČD. Sv. 29.
48. **Brandštetter, Pavel.** *Střídavé regulační pohony - Moderní způsoby řízení.* Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 1999. ISBN 80-7078-668-X.
49. **Google, Inc.** *Google Earth 6.0.1.2032 (beta)*. [web: <http://earth.google.com>] místo neznámé : Google, 2010.
50. *Modeling and Control Strategy Development for Fuel Cell Hybrid Vehicles.* **Ning, Q., Xuan, D. a Kim, Y.** 11, 2010, International Journal of Automotive Technology, Sv. 2, stránky 229-238. ISSN 1229-9138.
51. **ThermoAnalytics, Inc.** Battery Modeling. *www.thermoanalytics.com*. [Online] ThermoAnalytics, Inc., 2008. <http://www.thermoanalytics.com/docs/batteries.html>.
52. **Kowski, J Stephen.** *Advances in Lithium Ion Batteries Obviate Need for Ultracapacitors in Electric Vehicles.* South Carolina : University of South Carolina, 2010. Theses and Dissartation.
53. *Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Application.* **Tremblay, Olivier a Dessaint, Louis A.** Stavanger : autor neznámý, 2009. ISSN 2032-6653.
54. **Simburger, Edward J.** Prius White Paper. *www.solarelectricalvehicles.com*. [Online] Solar Electrical Vehicles, 2010. <http://www.solarelectricalvehicles.com/images/Solar-Prius-Proto-007.jpg>.
55. **Hamada, Motohiko.** Toyota Industries Develops Solar Charging Station for PHVs, EVs. *techon.nikkeibp.co.jp*. [Online] Nikkei Automotive Technology, 25. 12 2009. [http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS\\_EN/20091225/178895/](http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20091225/178895/).
56. **Kameš, J.** *Alternativní pohony automobilů.* Praha : BEN-technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-127-6.

## Seznam obrázků a grafů

Obrázek 1: Vícezdrojový systém pohonu vozidla .....	13
Obrázek 2: Hybridní motor třetí generace Toyota Prius (36).....	15
Obrázek 4: Palivový článek NEXA od firmy Ballard (38) .....	18
Obrázek 3: Principiální schéma činnosti palivového článku (37) .....	18
Obrázek 5: Autobus TriHyBus s pohonem s palivovými články (12).....	19
Obrázek 6: Princip činnosti fotovoltaického panelu a jeho konečná úprava (39).....	20
Obrázek 7: Dobíjecí stanice pro elektromobily a Toyota Prius s fotovoltaickými panely zabudovanými do střechy (54) (55) .....	20
Obrázek 8: Vnitřní struktura ultrakapacitoru (13).....	21
Obrázek 9: Kondenzátorová baterie 176F/46V .....	22
Obrázek 10: Uspořádání pohonné jednotky v hybridním závodním voze Porsche GT3R (15) .....	22
Obrázek 11: Setrvačnickový akumulátor Porsche (15) .....	23
Obrázek 12: Odporové síly působící na vozidlo během jízdy .....	24
Obrázek 13: Simulace proudnic odtékající vozidlo (40) .....	25
Obrázek 14: Rozklad sil odporu stoupání .....	26
Obrázek 15: Rotační části automobilu.....	28
Obrázek 16: Hnací síla a potřebný výkon pro překonání jízdních odporů.....	30
Obrázek 17: Sílové poměry na hnacím kole vozidla CityEL .....	31
Obrázek 18: Simulační model pohonné soustavy .....	33
Obrázek 19: Zadávací panel konstant simulačního modelu pohonné soustavy .....	34
Obrázek 20: Vnitřní struktura modelu pohonné jednotky .....	35
Obrázek 21: Vstupní blok modelové soustavy .....	36
Obrázek 22: Blok volby profilu.....	36
Obrázek 23: Blok omezení momentu.....	37
Obrázek 24: Blok omezení momentu.....	37
Obrázek 25: Vnitřní struktura bloku dynamiky vozidla.....	37
Obrázek 26: Mechatronický model pohonné soustavy vozidla.....	38
Obrázek 27: Blok bateriového managementu .....	39
Obrázek 28: Blok vektorově řízeného střídače s SMPM.....	39
Obrázek 29: Simulační model vícezdrojové jednotky s energetickým managementem nulté úrovně.....	40
Obrázek 30: Vývojový diagram energetického managementu nulté úrovně .....	41
Obrázek 31: Blokové schéma vícezdrojové jednotky vyšší úrovně.....	42
Obrázek 32: Typická vybíjecí křivka a významné body charakteristiky (24) .....	43
Obrázek 33: Nabíjecí charakteristiky NiMH a NiCd akumulátoru (23) .....	44
Obrázek 34: Nabíjecí charakteristiky olověného a Li-Ion akumulátoru (23).....	44
Obrázek 35: Blokové schéma simulačního modelu baterie (23).....	45
Obrázek 36: Simulační model akumulátoru.....	46
Obrázek 37: Vlastnosti akumulátoru - záložka parametry .....	47
Obrázek 38: Vlastnosti akumulátoru - Zobrazení vybíjecích charakteristik.....	48
Obrázek 39: Vlastnosti akumulátoru - Časová odezva .....	48
Obrázek 40: Náhradní schéma kondenzátoru .....	49
Obrázek 41: Zástupný symbol a vnitřní struktura subsystému modelu ultrakapacitorové baterie .....	49

Obrázek 42: Vlastnosti Ultrakapacitoru .....	52
Obrázek 43: Experimentální vozidlo CityEL.....	53
Obrázek 44: Elektrokolo, osobní i nákladní elektromobily od firmy Smiles AG (43) .....	54
Obrázek 45: Blokové schéma pohonné soustavy s DC motorem .....	56
Obrázek 46: CAD model zadní části vozidla CityEL s pohonnou soustavou s Pb akumulátory a stejnosměrným pohonem.....	56
Obrázek 47: CAD model stejnosměrného měniče.....	57
Obrázek 48: Blokové schéma pohonné jednotky soustavy s DC motorem a ultrakapacitory.....	58
Obrázek 49: CAD model zadní části vozidla CityEL s pohonnou soustavou s ultrakapacitory a stejnosměrným pohonem.....	58
Obrázek 50: CAD model měniče s ultrakapacitor .....	59
Obrázek 51: Blokové schéma pohonné soustavy se synchronním motorem s permanentními magnety.....	59
Obrázek 52: CAD model zadní části vozidla s pohonem se SMPM a $\text{LiFePO}_4$ akumulátor.....	60
Obrázek 53: CAD model článku $\text{LiFePO}_4$ a umístění akumulátorových sestav ve vozidle CityEL.....	61
Obrázek 54: Schéma zapojení $\text{LiFePO}_4$ akumulátorové baterie, balančních jednotek a řídicího systému BMS.....	61
Obrázek 55: Montáž balančních jednotek a detail řídicí jednotky BMS .....	62
Obrázek 56: Uživatelské prostředí programu BMS monitoring .....	62
Obrázek 57: CAD model třífázového střídače .....	63
Obrázek 58: CAD model použitého SMPM s nezávislým chlazením.....	64
Obrázek 59: Grafická závislost momentové charakteristiky $M = f(n)$ pro použitý SMPM (autor) .....	65
Obrázek 60: CAD model uchycení SMPM na nápravě vozidla .....	66
Obrázek 61: Letecký pohled na vybranou trať a výškový diagram jízdního profilu (49).....	68
Obrázek 62: Závislost průměrné rychlosti na zrychlení vozidla $W = f(a) @ v^*$ .....	76
Obrázek 63: Závislost spotřebované energie na žádaném zrychlení vozidla $W = f(a) @ v^*$ .....	76
Obrázek 64: Závislost doby jízdy na žádaném zrychlení vozidla $W = f(a) @ v^*$ .....	76
Obrázek 65: Nastavení modelu pro simulování vlastností vozidla CityEL na válcové zkušební výkonu.....	77
Obrázek 66: Simulační model pohonné jednotky s vyznačenými sledovanými body.....	81
Obrázek 67: Průběhy napětí a proudů v simulované soustavě.....	84
Obrázek 68: Vozidlo CityEL na válcové zkušební výkonu .....	86
Obrázek 69: Změřená rychlost vozidla a proud motorem .....	87
Obrázek 70: Grafický popis jízdního manévru úlohy č.1 .....	87
Obrázek 71: Průběhy napětí a proudů na ultrakapacitorové baterii.....	88
Obrázek 72: Grafický popis jízdního manévru úlohy č.2.....	88
Obrázek 73: Průběhy napětí a proudů ultrakapacitorové baterie.....	88
Obrázek 74: Demonstrační obrázek měřené úlohy.....	89
Obrázek 75: Proud (červená) a napětí (žlutá) akumulátoru při $F_b = 0\text{N}$ .....	90
Obrázek 76: Proud fáze SMPM motoru při $F_b = 0\text{N}$ .....	90
Obrázek 77: Grafická závislost spotřebované energie $W = f(t)$ , a poměru $P/P_n = f(t)$ .....	91
Obrázek 78: Proud (červená) a napětí (žlutá) akumulátoru při $F_b = 100\text{N}$ .....	92
Obrázek 79: Proud fáze SMPM motoru při $F_b = 100\text{N}$ .....	92
Obrázek 80: Grafická závislost spotřebované energie $W = f(t)$ a poměru $P/P_n = f(t)$ .....	93
Obrázek 81: Proud fáze SMPM motoru při $F_b = 200\text{N}$ .....	94

Pozn.: Jestliže není u obrázků uveden zdroj, obrázky a fotografie pocházejí z autorova archivu.

## Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Nejpoužívanější typy akumulátorů .....</i>	<i>17</i>
<i>Tabulka 2: Hodnoty aerodynamického koeficientu a čelní plochy vozidla (16) (17).....</i>	<i>25</i>
<i>Tabulka 3: Součinitel valivého odporu (21) .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 4: Parametry SMPM motoru (32) .....</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 5: Parametry vozidla CityEL a SMPM motoru .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 6: Vlastnosti vozidla při variabilní žádané rychlosti a zrychlení.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabulka 7: Shrnutí výsledku pro <math>F_b = 0N</math> .....</i>	<i>91</i>
<i>Tabulka 8: Shrnutí výsledků pro <math>F_b = 100N</math> .....</i>	<i>93</i>
<i>Tabulka 9: Shrnutí výsledků pro <math>F_b = 200N</math> .....</i>	<i>94</i>